

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
«ДОНБАССКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ»
– ФИЛИАЛ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

**VII открытая международная очно-заочная научно-практическая конференция
молодых ученых и студентов**

**«ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ИНЖЕНЕРНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
СИСТЕМАХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ»**

*Электронный сборник статей по материалам VII открытой международной очно-
заочной научно-практической конференции молодых ученых и студентов*

(20 февраля 2026 г., Макеевка)

Макеевка, 2026 г.



УДК 696/697.004.163(063)
ББК 38.7-03я43
Э 65

*Печатается по решению ученого совета ДОННАСА – филиала НИУ МГСУ, протокол № 6
от 07.04.2026 г.*

Редакционная коллегия:

- | | |
|------------------|---|
| Мушанов В. Ф. | – директор управления научно-исследовательской деятельности и инноваций, д.т.н., профессор, председатель оргкомитета; |
| Лукьянов А.В. | – декан факультета инженерных и экологических систем в строительстве, д.т.н., профессор; |
| Яковенко К.А. | – заведующий кафедрой городского строительства и хозяйства, к.т.н., доцент; |
| Найманов А.Я. | – профессор кафедры городского строительства и хозяйства, д.т.н., профессор; |
| Нездойминов А.Я. | – заведующий кафедрой водоснабжение, водоотведение и охраны водных ресурсов, д.т.н., профессор; |
| Удовиченко З.В. | – заведующий кафедрой теплотехники, теплогазо-снабжения и вентиляции, к.т.н., доцент. |

- Э65 Энергоресурсосбережение в инженерных и энергетических системах зданий и сооружений: электронный сборник научных трудов VII открытой международной очно-заочной научно-практической конференции молодых ученых и студентов / Редколлегия: В. Ф. Мушанов, А. В. Лукьянов, В. И. Нездойминов и др. - Макеевка, ДОННАСА – филиал НИУ МГСУ, 2026. - 287 с.

Электронный сборник содержит 49 научные работы участников VII открытой международной очно-заочной научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Энергоресурсосбережение в инженерных и энергетических системах зданий и сооружений». Материалы представлены по таким тематическим направлениям: «Энергоресурсосбережение», «Инженерная инфраструктура городов», «Надежность систем ТГВ и безопасности их эксплуатации», «Инновации в инженерных сетях: отопления, газоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха».

Данное издание будет полезно магистрантам, студентам, молодым ученым и всем интересующимся актуальным состоянием и тенденциями развития современной науки по рассматриваемым тематическим направлениям.

Научное электронное издание

Авторы научных статей несут ответственность за оригинальность текстов, а также достоверность изложенных фактов и положений.

УДК 697.7

Редкий Артемий Владимирович,
магистрант гр. ТГВм-55а;
Иващенко Екатерина Александровна,
магистрант гр. ОЗТГВм-55а;
Максимова Наталья Анатольевна,
к.т.н., доцент, доцент каф. ТТГВ,
ДОННАСА – филиал НИУ МГСУ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ТЕПЛО- И ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ

В статье рассматривается актуальность и потенциал использования солнечной энергии для обеспечения тепловой и холодильной нагрузок зданий. Проанализированы основные технологические решения: солнечные тепловые коллекторы для генерации тепла, фотоэлектрические системы (PV) для электропитания тепловых насосов и компрессионных чиллеров, а также гибридные фотоэлектрические тепловые коллекторы (PVT). Отдельное внимание уделено технологиям солнечного охлаждения — адсорбционным и абсорбционным холодильным машинам, приводящимся от тепловой энергии. Рассмотрены вопросы сезонного аккумулирования энергии, интеграции в гибридные системы и экономической эффективности. На основе анализа сделан вывод о том, что солнечная энергетика является ключевым элементом для создания зданий с нулевым энергобалансом и декарбонизации жилищно-коммунального сектора.

Ключевые слова: солнечная энергия, теплоснабжение, холодоснабжение, солнечный коллектор, фотоэлектрическая система, абсорбционная холодильная машина, сезонное аккумулирование, здание с нулевым энергопотреблением.

Декарбонизация энергетического сектора и повышение энергоэффективности зданий являются глобальными приоритетами в условиях изменения климата. На отопление, вентиляцию, кондиционирование воздуха и горячее водоснабжение (ГВС) приходится значительная доля конечного энергопотребления. Солнечная энергия, как повсеместно доступный и возобновляемый ресурс, предлагает устойчивую альтернативу ископаемым видам топлива для покрытия этих нагрузок. Современные технологии позволяют не только преобразовывать солнечное излучение в тепло, но и использовать его для производства холода, что решает проблему пикового энергопотребления на кондиционирование в летний период.

Целью данной статьи является комплексный обзор и анализ технологических цепочек для тепло- и холодоснабжения зданий на основе солнечной энергии.

Технологии преобразования солнечной энергии

1. Солнечные тепловые системы (СТС)

СТС являются наиболее прямым способом использования солнечной энергии для теплоснабжения.

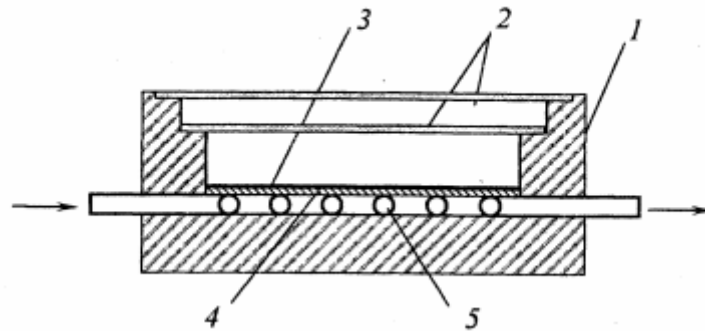
Плоские коллекторы: надежные и относительно недорогие устройства для производства горячей воды (до 80-90°C) в системах ГВС и отопления с низкотемпературными приборами (теплые полы).

Вакуумные трубчатые коллекторы: обладают более высокой эффективностью за счет снижения теплопотерь, способны генерировать теплоноситель с температурой до 120-150°C. Критически важны для привода термотрансформационных холодильных циклов (абсорбционных/адсорбционных машин).

Солнечные воздушные коллекторы: простое решение для пассивного или принудительного воздушного отопления помещений.

Наибольшее распространение получили коллекторы плоского типа (рисунок 1). Они работают при прямом и рассеянном излучении и изготавливаются в виде неглубокого теплоизолированного корпуса с прозрачным покрытием и поглощающим элементом на его дне. Воспринимающие элементы коллекторов покрывают селективно поглощающими пленками с высоким коэффициентом поглощения и малым коэффициентом излучения. Лучшими из них являются покрытия из «черного хрома», «черного никеля», закиси меди и др.

К преимуществам плоских солнечных коллекторов относят простоту конструкции и их относительно невысокую стоимость. Недостатками являются: относительно невысокий коэффициент полезного действия (КПД) по сравнению с трубчатыми солнечными коллекторами, и большая зависимость тепла, вырабатываемого от периода светового дня.



1- теплоизолированный корпус; 2 - стеклянное покрытие; 3 - селективно-поглощающее покрытие; 4 - медная теплопроводная пластина; 5 - трубки для теплоносителя

Рисунок 1 - Строение плоского гелиоколлектора

2. Фотоэлектрические системы (PV)

Преобразование солнечного излучения в электричество открывает широкие возможности для тепло- и холодоснабжения через электроприводные устройства:

Электрические тепловые насосы (ТН): PV-системы могут обеспечивать работу высокоэффективных ТН «воздух-вода» или «грунт-вода» для отопления и ГВС. Сезонный коэффициент преобразования таких систем может превышать 3.0, что значительно повышает эффективность использования каждого киловатт-часа солнечной электроэнергии.

Компрессионные чиллеры и кондиционеры: прямое питание от PV-систем позволяет осуществлять кондиционирование помещений без нагрузки на электросеть.

Электрические котлы и ТЭНы: менее эффективный, но простой способ аккумулирования избыточной солнечной электроэнергии в виде тепла в буферных емкостях.

3. Гибридные фотоэлектрические тепловые коллекторы (PVT)

PVT-коллекторы совмещают генерацию электричества и тепла в одном модуле. Охлаждение фотоэлектрических элементов теплоносителем повышает их электрическую эффективность (снижая перегрев) и одновременно производит тепловую энергию. Это позволяет увеличить общую энергоотдачу с единицы площади кровли.

Технологии солнечного охлаждения

1. Абсорбционные холодильные машины (АБХМ)

Принцип работы основан на термохимическом цикле в паре «хладагент-абсорбент» (например, вода-бромистый литий $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ или аммиак-вода $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$). Для регенерации (десорбции) раствора требуется источник тепла с температурой $75\text{-}120^\circ\text{C}$, который может поставляться вакуумными солнечными коллекторами. АБХМ идеально согласуются с СТС, так как пик производства солнечного тепла совпадает с пиком потребности в холоде.

2. Адсорбционные холодильные машины (АДХМ)

Используют твердый адсорбент (силикагель, цеолит) и хладагент (вода). Требуют более высоких температур регенерации ($120\text{-}200^\circ\text{C}$), но могут работать при более низких

температурах источника тепла на стадии охлаждения. Отличаются простотой конструкции, долговечностью и возможностью использования низкопотенциального тепла.

Ключевые аспекты проектирования и интеграции

Основная проблема солнечной энергетики — несовпадение графика генерации с нагрузкой (зимний дефицит тепла, летний избыток). Решением являются системы сезонного аккумулирования тепла (СТА):

—аккумуляторы на основе воды: большие подземные резервуары (до десятков тысяч м³).
—грунтовые тепловые аккумуляторы: использование массива грунта вокруг скважинных теплообменников.

—химическое и термохимическое аккумулирование: на основе гидратации солей или адсорбционных процессов, обладающее высокой плотностью хранения и малыми потерями.

В условиях изменчивой инсоляции 100-процентная солнечная нагрузка нерентабельна. Оптимальной является гибридизация:

— солнце + тепловой насос: солнечная система покрывает базовую нагрузку, тепловой насос — пиковую и нагрузку в периоды низкой инсоляции;

— солнце + традиционный котел/сеть: солнечная установка выполняет функцию предварительного подогрева или покрытия нагрузки в переходный период;

— интеграция с системами вентиляции: использование солнечного тепла для подогрева приточного воздуха или регенерации роторного энтальпийного рекуператора.

Внедрение солнечных систем стимулируется через:

— снижение капитальных затрат за счет технологического прогресса и массового производства;

— тарифы на «зеленый» тепло- и холодо-порт (feed-in tariffs);

— нормативы по доле возобновляемых источников энергии в новом строительстве (как в стандартах пассивных домов и зданий NZEB).

Использование солнечной энергии для тепло- и холодоснабжения зданий перестало быть экспериментальной технологией и перешло в стадию коммерчески жизнеспособного решения. Наиболее перспективными направлениями развития являются:

1. Массовое внедрение гибридных PVT-систем с высокой интеграцией в строительные конструкции (BIPV/T).

2. Развитие эффективных и компактных систем термохимического аккумулирования для решения проблемы межсезонного несоответствия.

3. Создание интеллектуальных систем управления, оптимизирующих работу гибридного солнечно-теплонасосного оборудования с учетом прогноза погоды, тарифов и поведения пользователей.

4. Стандартизация и типизация решений для снижения стоимости проектирования и монтажа.

Комплексный подход, сочетающий солнечные тепловые и фотоэлектрические технологии с тепловыми насосами и системами аккумулирования, способен обеспечить значительную, а в оптимальных случаях — полную автономию здания в вопросах тепла и холода, внося решающий вклад в устойчивое развитие энергетики.

Список литературы

1. Стандарт АВОК 1-2022. Здания с почти нулевым энергопотреблением. Принципы проектирования. — Москва : АВОК-ПРЕСС, 2022. — 85 с.

2. Горин, А. Н. Альтернативные холодильные системы и системы кондиционирования воздуха / А. Н. Горин, А. В. Дорошенко. — 2-е изд., перераб. и доп. — Донецк : Норд-Пресс, 2007. — 362 с.

3. Даффи, Дж. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж. А. Даффи, У. А. Бекман ; пер. с англ. — Москва : Мир, 2017. — 680 с.

4. Плотников, К. В. Кондиционирование зданий посредством солнечной энергии / К. В. Плотников, А. И. Алифанова, А. С. Семенов // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 7-2. – С. 59–61.

5. Плешка, М. С. Система кондиционирования микроклимата здания с использованием солнечной энергии : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.03 / Плешка Михаил Семенович. – Москва, 2005. – 288 с.

УДК 620.95

Удовиченко Злата Викторовна,
к.т.н., доцент, зав. кафедрой ТТГВ;
Дерега Екатерина Сергеевна,
магистрант гр. ЗТГВм-55а;
Сергиенко Наталья Николаевна,
магистрант гр. ЗТГВм-56а,
ДОННАСА-филиал НИУ МГСУ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОГАЗА В СИСТЕМАХ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ МАЛЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

В статье рассмотрены возможности применения биогазовых технологий для обеспечения энергоресурсами малых населенных пунктов. В статье комплексно исследована проблема энергообеспечения малых населенных пунктов, не имеющих доступа к централизованным магистральным газопроводам, с использованием альтернативных источников энергии. Основной целью работы является оценка технико-экономической целесообразности внедрения биогазовых технологий в системы автономного газоснабжения сельских территорий. Рассмотрены технологические основы процесса анаэробного сбраживания органических отходов. Приведены основные расчетные зависимости и формулы для определения производительности биогазовых установок в зависимости от видов сырья и объемов органической загрузки. Обоснована экономическая эффективность внедрения биогазовых систем со сроком окупаемости капитальных вложений от 5 до 8 лет. Дополнительно оценен экологический эффект, выражающийся в снижении выбросов парниковых газов и утилизации органических отходов с получением высококачественных удобрений.

Ключевые слова: биогаз, метановое брожение, анаэробное сбраживание, автономное газоснабжение, энергоресурсосбережение, органические отходы, малые населенные пункты.

Введение

Энергообеспечение малых населенных пунктов, особенно в отдаленных и сельских территориях, остается актуальной проблемой современной энергетики. Многие населенные пункты не имеют доступа к централизованным системам газоснабжения, что требует поиска альтернативных источников энергии. В этом контексте использование биогаза представляет собой экологически чистый и экономически оправданный способ газоснабжения удаленных территорий [1].

Биогаз – это газ, получаемый метановым брожением биомассы. Процесс происходит в бактериальной биомассе и включает конверсию сложных органических соединений – полисахаров, жиров и белков в метан CH_4 и оксид углерода CO_2 [2].

Технологические основы производства биогаза

Процесс анаэробного сбраживания

Анаэробное сбраживание (метановое брожение) – процесс биологического разложения органических веществ с выделением свободного метана под воздействием микроорганизмов в отсутствие кислорода [3]. Биологическая конверсия органических отходов в биогаз состоит из 4 основных стадий:

1. Гидролиз – трансформация сложных молекул органического вещества (полисахаридов, белков, жиров) в простые растворимые соединения (сахара, аминокислоты, жирные кислоты);

2. Кислотогенез (ацидогенез) – сбраживание образовавшихся мономеров до летучих жирных кислот (ЛЖК), а также спиртов;
3. Ацетогенез – преобразование продуктов кислотогенеза в ацетат, водород и углекислый газ;
4. Метаногенез – образование метана из ацетата (ацетокластический метаногенез) и восстановление CO_2 водородом.

Процесс метанового брожения включает три основные стадии: гидролитическую (гидролиз полисахаридов в среде органического происхождения), ацидогенную (сбраживание образовавшихся простых соединений) и метаногенную.

Состав и характеристики биогаза

Метановый компонент биогаза обычно составляет от 45% до 75% по объему, остальное преимущественно CO_2 . В зависимости от метода производства и предполагаемого использования, биогаз содержит от 50% до более 90% метана по объему [4].

Таблица 1 – Типичный состав биогаза

Компонент	Содержание, % об.
1	2
Метан (CH_4)	50–75
Диоксид углерода (CO_2)	25–45
Водяной пар (H_2O)	0–10
Азот (N_2)	0–5
Кислород (O_2)	0–2
Сероводород (H_2S)	0–1

Энергетическая ценность биогаза напрямую зависит от содержания метана. Высокотемпературное анаэробное сбраживание обычно производит биогаз с содержанием CH_4 70...75%, тогда как при низких температурах содержание метана составляет около 55...60% [4].

Расчет основных параметров биогазовых установок

Методика расчета производительности

Теоретические расчеты количества биогаза и концентрации метана и диоксида углерода могут быть выполнены с использованием стехиометрических химических уравнений [4,5].

Основное уравнение для расчета годового выхода биогаза

$$V_{\text{год}} = N \cdot m_{\text{орг}} \cdot \eta \cdot 365, \quad (1)$$

где $V_{\text{год}}$ – годовой выход биогаза, $\text{м}^3/\text{год}$;

N – количество голов скота (или условных единиц);

$m_{\text{орг}}$ – масса органических отходов от одной головы в сутки, $\text{кг}/\text{гол} \cdot \text{сут}$;

η – удельный выход биогаза из 1 кг органического вещества, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Количество метана в биогазе рассчитывается по формуле

$$V_{\text{CH}_4} = V_{\text{биогаза}} \cdot \frac{C_{\text{CH}_4}}{100}, \quad (2)$$

где V_{CH_4} – объем метана, м^3 ;

C_{CH_4} – концентрация метана в биогазе, % об. [5].

Объем биогаза может быть определен через скорость органической загрузки:

$$V_{\text{биогаза}} = OLR \cdot Y \cdot V_{\text{реактора}}, \quad (3)$$

где OLR – скорость органической загрузки (Organic Loading Rate), кг ВС/м³·сут;
 Y – выход биогаза из субстрата, м³/кг ВС;
 $V_{\text{реактора}}$ – объем реактора, м³ [5].

Пример расчета для малого населенного пункта

Рассмотрим расчет биогазовой установки для сельского населенного пункта численностью 500 человек, имеющего:

- КРС: 200 голов;
- свиней: 500 голов;
- птицы: 2000 голов.

Таблица 2 – Удельный выход биогаза из различных видов сырья

Вид сырья	Удельный выход биогаза, м ³ /кг	Содержание метана, %
1	2	3
Навоз КРС	0,02–0,03	55–65
Навоз свиней	0,04–0,06	60–70
Помет птичий	0,03–0,05	60–65
Отходы растениеводства	0,05–0,08	50–60

Расчет суточного выхода биогаза:

$$V_{\text{сут}} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot m_i \cdot \eta_i, \quad (4)$$

где N_i – количество животных i -го вида;
 m_i – масса отходов от одной головы;
 η_i – удельный выход биогаза.

При средней массе навоза КРС 40 кг/гол·сут, свиного навоза 3 кг/гол·сут и птичьего помета 0,15 кг/гол·сут

$$V_{\text{сут}} = 200 \cdot 40 \cdot 0,25 + 500 \cdot 3 \cdot 0,05 + 2000 \cdot 0,15 \cdot 0,04 = 287 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Годовой выход товарного биогаза с учетом коэффициента использования (0,85)

$$V_{\text{год}} = 287 \cdot 365 \cdot 0,85 = 89147 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Интеграция биогаза в системы газоснабжения

Схемы использования биогаза

Для малых населенных пунктов возможны следующие схемы использования биогаза:

1. Децентрализованная система – индивидуальная биогазовая установка для одного домохозяйства или небольшой фермы;

2. Локальная микросеть – централизованная биогазовая установка с распределением газа по локальной сети поселка;

3. Комбинированная система – биогазовая установка с возможностью производства электроэнергии и тепла (когенерация).

Технические требования

Для использования в системах газоснабжения биогаз должен пройти очистку:

- удаление сероводорода (H_2S) до уровня $< 20 \text{ мг/м}^3$;
- осушка (удаление водяного пара);
- удаление CO_2 (при необходимости получения биометана).

Метановое число биогаза после очистки должно составлять не менее 65–70 для использования в стандартном газовом оборудовании.

Энергоэффективность и экономические аспекты

Энергетический баланс

Производительность биогазовой установки по биогазу определяется по формуле [5]

$$P = \frac{V_{\text{тов}}}{t}, \quad (5)$$

где $V_{\text{тов}}$ – объем товарного биогаза;
 t – время работы установки.

Удельный годовой выход товарного биогаза рассчитывается как

$$q_{\text{уд}} = \frac{V_{\text{тов}}}{N_{\text{гол}}}, \quad (6)$$

где $N_{\text{гол}}$ – количество условных голов скота [5].

Экономическая эффективность

Экономический расчет эффективности биогазовой установки выполняется по формуле [6]:

$$\mathcal{E} = K \cdot C_{\text{п}} (C_{\text{газ}} \cdot V_{\text{год}} + C_{\text{удобр}} \cdot M_{\text{удобр}}) - \mathcal{Z}_{\text{экспл}}, \quad (7)$$

где K – коэффициент использования ($K = 8,64 \cdot 10^{-2}$);
 $C_{\text{п}}$ – количество суток в расчетном периоде;
 $C_{\text{газ}}$ – цена биогаза;
 $C_{\text{удобр}}$ – цена органических удобрений;
 $M_{\text{удобр}}$ – масса полученных удобрений;
 $\mathcal{Z}_{\text{экспл}}$ – эксплуатационные затраты.

Срок окупаемости биогазовых установок для малых населенных пунктов составляет 5–8 лет при условии стабильной сырьевой базы.

Экологические преимущества

Использование биогаза в системах газоснабжения малых населенных пунктов обеспечивает:

- снижение выбросов парниковых газов – одна тонна выброшенного метана эквивалентна 28–34 тоннам CO_2 [7];
- утилизацию органических отходов – переработка до 100% органической фракции;
- производство органических удобрений – получение высококачественных удобрений из сброженной биомассы;
- улучшение санитарной обстановки – снижение риска распространения патогенных микроорганизмов.

Биогазовые установки малой мощности могут обеспечить доступным топливом для приготовления пищи, отопления и освещения сельские сообщества, способствуя снижению бедности и местному экономическому развитию [7].

Выводы

Использование биогаза в системах газоснабжения малых населенных пунктов является перспективным направлением развития распределенной энергетики, особенно для территорий, удаленных от магистральных газопроводов.

Донецкий регион обладает значительным потенциалом производства биогаза (89–140 млн м³/год) за счет наличия развитого агропромышленного комплекса и органических отходов.

Опыт реализации биогазовых проектов в Волновахе и Мариуполе до военных действий демонстрирует техническую реализуемость и экономическую целесообразность таких решений.

Для широкого внедрения биогазовых технологий в малых населенных пунктах необходимо:

- развитие нормативно-правовой базы;
- предоставление льготного кредитования;
- создание региональных центров компетенций;
- подготовка квалифицированных кадров.

Интеграция биогаза в системы автономного газоснабжения способствует достижению целей энергоресурсосбережения, снижению зависимости от ископаемого топлива и улучшению экологической обстановки в сельских территориях.

Список литературы

1. Морозов, А. А. Автономные системы газоснабжения для удаленных территорий / А. А. Морозов, Р. Ф. Добрянский, С. Д. Горошко и др. // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 6. Режим доступа: <https://esj.today/PDF/81SAVN624.pdf>
2. Караваева, Ю. В. Исследование процесса анаэробного сбраживания коровьего навоза и растительных отходов / Ю. В. Караваева, С. С. Тимофеев // Научно-теоретический журнал Вестник Ульяновской ГСА. — 2019. — № 4. — С. 6–11.
3. Кожевникова, А. Н. Биотехнология и микробиология анаэробной переработки органических коммунальных отходов // А. Н. Кожевникова, А. Ю. Каллистова, Ю. В. Литти и др. — Курск : Университетская книга, 2020. — 320 с.
4. Кильчукова, О. Х. Расчет теплообменного устройства биогазовой установки / О. Х. Кильчукова, Ф. Б. Биязуркаевич, А. Г. Хамоков, М. М. Темукуев // Аграрный вестник Северного Кавказа. — 2015. — №3(19). — С. 36-40.
5. Имомов, Ш. Ж. Технологические основы рекуперации тепловых отходов биогазовых установок / Ш. Ж. Имомов. — Ташкент : Фан, 2011. — 161 с.
6. Дупанов, А. В. Экономическая оценка эффективности использования простейшей биогазовой установки / А. В. Дупанов, А. Н. Баран // Агропанорама. — 2007. — N 2. — С. 32-35.
7. Найман, С. М. Экологические и экономические аспекты применения биогазовых технологий для переработки органических отходов / С. М. Найман, Ю. А. Тунакова // Вестник технологического университета, 2025. — №. 17. — С. 191-196.

УДК 697.34

Удовиченко Злата Викторовна,
к.т.н., доцент, зав. каф. ТТГВ;
Огнев Никита Сергеевич,
аспирант 1 года обучения каф. ТТГВ;
Кныш Никита Сергеевич,
магистрант гр. ЗТГВм-56а,
ДОННАСА-филиал НИУ МГСУ

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПУНКТОВ ПО СРАВНЕНИЮ С ЦЕНТРАЛЬНЫМИ ДЛЯ УСЛОВИЙ ДОНБАССА

Анализ эффективности индивидуальных тепловых пунктов (ИТП) по сравнению с центральными (ЦТП) в условиях приграничных территорий России, включая Донбасс, выявил принципиальные преимущества умеренно децентрализованной модели теплоснабжения. Исследование показало, что ИТП обеспечивают снижение теплопотребления на 10–30% за счёт точного погодозависимого регулирования, ликвидируют уязвимые распределительные сети горячего водоснабжения с не большим фактическим сроком службы и минимизируют «зону поражения» при авариях. Для фрагментарно восстанавливаемой застройки Донбасса ИТП позволяют реализовать точечное подключение домов к магистральным сетям без экономически неоправданных инвестиций в промежуточную инфраструктуру. Установлено, что переход на ИТП соответствует рекомендациям «Методических указаний по разработке схем теплоснабжения», утвержденных Приказом Минэнерго России от 05.03.2019 №212 (ред. от 11.09.2024). В документе указаны «Предложения по переводу открытых систем теплоснабжения (горячего водоснабжения) в закрытые системы горячего водоснабжения», что повышает устойчивость жизнеобеспечения систем теплоснабжения и горячего водоснабжения в условиях нестабильной гидравлики и поэтапного возвращения населения на постоянное место жительства в Донбасс.

Ключевые слова: индивидуальный тепловой пункт, центральный тепловой пункт, теплоснабжение, Донбасс, приграничные территории, энергоэффективность, надёжность, горячее водоснабжение, фрагментарная застройка.

Введение

Теплоснабжение в России имеет стратегическое экономическое и социальное значение, а любые сбои в обеспечении потребителей тепловой энергией негативно сказываются на жизнедеятельности регионов. Согласно Энергетической стратегии России, одной из ключевых задач является оптимальное снижение уровней централизации систем теплоснабжения с целью повышения их надёжности и снижения затрат на передачу тепловой энергии [1]. Эта задача приобретает особую актуальность для приграничных территорий, включая Донбасс, где разрушение инфраструктуры, фрагментарность восстановления жилого фонда и повышенная уязвимость сетей требуют пересмотра традиционных схем абонентских подключений. В этих условиях выбор между централизованными тепловыми пунктами (ЦТП), обслуживающими гр. зданий, и индивидуальными тепловыми пунктами (ИТП), установленными непосредственно в каждом объекте, становится не только техническим, но и стратегическим решением для обеспечения устойчивого жизнеобеспечения населения.

Классификация и особенности схем подключения

Традиционная схема с центральными тепловыми пунктами предполагает промежуточное звено между магистральными сетями и конечными потребителями: теплоноситель от ТЭЦ или котельной поступает на ЦТП, где происходит его распределение по системам отопления и горячего водоснабжения (ГВС) для гр. зданий (обычно 2–5 домов с

суммарной нагрузкой 12–35 МВт) [2]. Критическим недостатком данной схемы является необходимость прокладки разветвлённых сетей ГВС от ЦТП до каждого здания. Статистика показывает, что трубопроводы ГВС при закрытой схеме теплоснабжения от ЦТП имеют фактический срок службы всего 2–10 лет против 20–25 лет у систем отопления из-за использования не подготовленной водопроводной воды в качестве теплоносителя, что вызывает интенсивную внутреннюю коррозию [3].

Индивидуальные тепловые пункты, размещаемые непосредственно в подвальных или технических помещениях зданий, устраняют необходимость прокладки распределительных сетей ГВС. Согласно СП 510.1325800.2022 [4], ИТП представляет собой комплекс оборудования для присоединения одного здания к тепловой сети, обеспечивающий автоматическое регулирование параметров теплоносителя, учёт потребления и подготовку горячей воды непосредственно у потребителя.

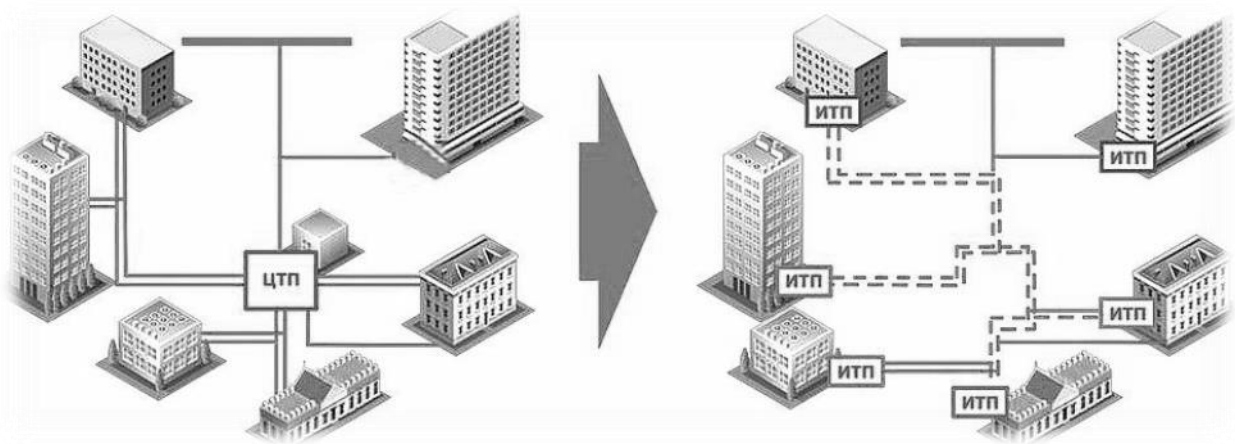


Рисунок 1 – Схема теплоснабжения при переходе на ИТП

Современные ИТП реализуются по зависимой схеме (с циркуляционным насосом и регулирующим клапаном) или независимой схеме (с теплообменником), что обеспечивает защиту внутренних систем от колебаний давления и качества теплоносителя [5].

Сравнительный анализ эффективности проводился по трём критериям: энергетическая эффективность, локализация отказов и экономика жизненного цикла системы теплоснабжения.

Ключевым преимуществом ИТП является возможность точного погодозависимого регулирования непосредственно у потребителя. Автоматика ИТП корректирует температуру теплоносителя в реальном времени в зависимости от температуры наружного воздуха, что исключает «перетопы» в переходные периоды. В отличие от ЦТП, где регулирование ориентировано на «средний» температурный график для гр. зданий с разной тепловой инерцией и степенью износа ограждающих конструкций, ИТП обеспечивает индивидуальный подход к каждому объекту. Это позволяет снизить теплопотребление на 10–30% [6]. Особенно критично это преимущество для Донбасса, где в условиях энергодефицита и повреждённой инфраструктуры каждый процент экономии тепловой энергии имеет стратегическое значение.

Для постконфликтных территорий принципиальное значение имеет локализация отказов. При выходе из строя ЦТП или повреждении распределительных сетей ГВС теряется теплоснабжение сразу нескольких домов (500–2000 жителей). При схеме с ИТП отказ одного пункта затрагивает лишь один объект, а повреждение магистрального трубопровода не влечёт за собой масштабных отключений из-за отсутствия разветвлённых сетей низкого давления. Кроме того, ИТП проще временно перевести на резервный источник тепла (мини-котельную) — требуется подключение только одного здания, тогда как для ЦТП создание резерва экономически нецелесообразно из-за масштаба обслуживаемой территории [7].

Хотя капитальные затраты на единицу мощности у ЦТП ниже за счёт эффекта масштаба, в условиях фрагментарного восстановления инфраструктуры Донбасса этот фактор теряет значение. Восстановление распределительных сетей от ЦТП до изолированных домов, расположенных «островами» среди разрушенных кварталов, экономически неоправданно и создаёт дополнительные уязвимые участки инфраструктуры. ИТП позволяют подключать каждый восстановленный дом непосредственно к сохранившимся магистральным сетям, минимизируя протяжённость новых коммуникаций и «мёртвые» инвестиции. Согласно данным практики внедрения в Республике Татарстан, поэтапная замена ЦТП на ИТП при одновременной ликвидации сетей ГВС позволила снизить эксплуатационные расходы на 25–40% за счёт устранения постоянных ремонтов корродированных трубопроводов [8].

Особенности применения в условиях Донбасса

Специфика приграничных и постконфликтных территорий накладывает дополнительные требования к выбору схемы теплоснабжения:

1. **Фрагментарность застройки.** Восстановление жилого фонда Донецка и Луганска происходит неравномерно - отдельными домами или кварталами, окружёнными разрушенными территориями. Прокладка распределительных сетей от ЦТП к изолированным объектам не только экономически неэффективна, но и создаёт дополнительные точки уязвимости. ИТП позволяют реализовать «точечное» подключение без промежуточной инфраструктуры.

2. **Высокий износ сетей.** По данным Минэнерго РФ, около 50% объектов коммунального теплоснабжения в России требуют замены, а в отопительный период 2022–2023 гг. количество аварий на магистральных сетях выросло на 16% [9]. Для Донбасса, где инфраструктура подвергалась прямым повреждениям, износ значительно выше. Схема с ИТП минимизирует количество уязвимых элементов системы за счёт ликвидации распределительных сетей ГВС и сокращения протяжённости сетей низкого давления.

3. **Необходимость быстрого развёртывания.** Блочные ИТП поставляются в сборе и монтируются за 2–4 недели, тогда как восстановление ЦТП с распределительными сетями занимает 6–12 месяцев. Для ускоренного решения жилищного вопроса возвращающихся жителей скорость внедрения ИТП становится критическим фактором.

4. **Адаптация к изменяющимся нагрузкам.** В условиях постепенного возвращения населения тепловая нагрузка зданий меняется непредсказуемо. ИТП с частотно-регулируемыми приводами эффективно работают в диапазоне нагрузок 20...100%, тогда как ЦТП экономически эффективны лишь при стабильной нагрузке выше 60...70% проектной мощности.

5. **Соответствие законодательным требованиям.** Федеральный закон № 417 от 07.12.2011 предусматривает поэтапный переход систем теплоснабжения на закрытую схему с ликвидацией ЦТП и установкой ИТП у потребителей [10]. Для восстанавливаемых территорий Донбасса это требование может быть реализовано сразу при реконструкции, минуя этап модернизации устаревших ЦТП.

Выводы

1. При новом строительстве и капитальной реконструкции жилых домов на территориях с фрагментарной застройкой применять схему с ИТП в качестве базового решения с одновременной ликвидацией сетей ГВС от ЦТП.

2. Для сохранившихся микрорайонов с устойчивым населением допустимо временное сохранение ЦТП при условии их модернизации с заменой элеваторных узлов на автоматизированные системы регулирования.

3. При проектировании магистральных сетей закладывать возможность прямого подключения зданий через ИТП без промежуточных распределительных сетей низкого давления.

4. Разработать типовые решения ИТП, адаптированные к специфике приграничных территорий: повышенная ремонтпригодность, возможность работы при колебаниях гидравлического режима, резервирование критических элементов.

Переход к децентрализованной модели теплоснабжения с доминированием ИТП не является универсальным решением для всей страны, но для специфических условий постконфликтных территорий он обеспечивает оптимальный баланс между надёжностью, экономичностью и скоростью восстановления жизнеобеспечения населения. В контексте восстановления Донбасса выбор в пользу ИТП — это стратегический шаг к созданию более устойчивой и жизнеспособной инфраструктуры будущего.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Утв. распоряжением Правительства РФ от 12.04.2025 г. № 908-р. — М.: Минэнерго России, 2020. — 107 с.
2. Чистович, С. А. Технологические схемы систем теплофикации, теплоснабжения и отопления / С. А. Чистович АВОК: Вентиляция. Отопление. Кондиционирование : журнал по вентиляции, отоплению, кондиционированию воздуха, теплоснабжению и строительной теплофизике М. 2007. № 7 С. 10-18 (Отопление и теплоснабжение) ISSN 0868-4294.
3. Требования к системам теплоснабжения. Утв. постановлением Правительства РФ от 22.02.2012 г. № 154 (ред. от 07.10.2024). М. : 2012. - .46 с.
4. СП 510.1325800.2022 «Тепловые пункты и системы внутреннего теплоснабжения». утв. Приказом Минстроя России от 25.01.2022 № 42/пр. — М. : Минстрой России, 2022. — 77 с.
5. Алимкулова, С. Р. Сравнение зависимой и независимой схемы подключения индивидуального теплового пункта к тепловой сети / С. Р. Алимкулова // Научному прогрессу — творчество молодых. — 2018. — № 2. — С. 57-58.
6. Маркелов, М. Д. Оценка энергоэффективности теплоснабжения жилых многоквартирных домов при замене центральных тепловых пунктов на автоматизированные индивидуальные тепловые пункты / М. Д. Маркелов // Современная наука: актуальные проблемы, достижения и инновации : Сб. статей по матер. V Всероссийской научно-практич. конф., Белебей, 24 апреля 2024 года. — Белебей: СамГТУ, 2024. — С. 79-83.
7. Свинцов, А. П. Эксплуатационная надежность оборудования в индивидуальных тепловых пунктах / А. П. Свинцов, А. Е. Андросов // Жилищное строительство. - 2019. - № 12. - С. 45–51.
8. Звонарева, Ю. Н. Эксплуатационная надежность оборудования в индивидуальных тепловых пунктах / Ю. Н. Звонарева, Ю. В. Ваньков // Проблемы энергетики. - 2017. — Том 19, № 1-2. - С. 31-40.
9. ОТЧЕТ о состоянии теплоэнергетики и централизованного теплоснабжения в Российской Федерации в 2023 году. — М. : РЭА Минэнерго России, 2023. — 163 с.
10. Требования к схемам теплоснабжения, порядку их разработки и утверждения. Утв. постановлением Правительства РФ от 22 февраля 2012 г. N 154 [электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://base.garant.ru/70144110/>

УДК 62-621.2

Прудникова Яна Валентиновна,
магистрант гр. ОЗТГВм-55а;
Полковников Алексей Андреевич,
ассистент каф. ТТГВ,
ДОННАСА-филиал НИУ МГСУ

ПРИМЕНЕНИЕ В ПУНКТАХ РЕДУЦИРОВАНИЯ ГАЗА ОБОРУДОВАНИЯ С УВЕЛИЧЕННЫМИ СРОКАМИ МЕЖДУ ТЕХНИЧЕСКИМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ И ТЕКУЩИМ РЕМОНТОМ

В статье рассмотрен комплексный подход к повышению надёжности и эффективности систем газоснабжения за счёт внедрения в пунктах редуцирования газа (ПРГ) оборудования с увеличенными сроками между обслуживаниями. Показано, что применение современных материалов, цифрового мониторинга и адаптивных нормативов позволяет сократить эксплуатационные затраты, минимизировать технологические потери газа и перейти к обслуживанию по фактическому состоянию. Обоснована экономическая и экологическая целесообразность данного подхода в рамках выполнения требований законодательства об энергосбережении.

Ключевые слова: пункт редуцирования газа, межсервисный интервал, техническое обслуживание, энергоресурсосбережение, технологические потери газа.

Вопрос надежности и экономической эффективности систем газоснабжения сегодня находится в фокусе стратегического развития отрасли, во многом инициированного требованиями Федерального закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении» [1]. Особое внимание уделяется деятельности газораспределительных организаций (ГРО), для которых, как отмечается в аналитических материалах крупнейших отраслевых компаний, основным потребляемым энергоресурсом при эксплуатации сетей является природный газ [2]. В свете законодательных норм ключевой задачей становится не только обеспечение бесперебойности, но и минимизация потерь, а также оптимизация собственных эксплуатационных затрат. В этом контексте внедрение в пунктах редуцирования газа (ПРГ) оборудования, рассчитанного на увеличенные межсервисные интервалы, представляет собой комплексное решение, затрагивающее сразу несколько аспектов эффективности и прямо соответствующее целям программ энергосбережения.

Традиционные подходы к техническому обслуживанию и текущему ремонту, сопряженные с частыми плановыми остановками, несут в себе значительные прямые и косвенные издержки. Помимо расходов на материалы и работу персонала, каждый такой цикл потенциально связан с технологическими потерями газа, которые, как известно, являются неизбежной составляющей эксплуатации распределительных сетей [2]. Эти потери возникают через разъемные соединения на газопроводах и оборудовании вследствие их конструктивных особенностей [3]. Именно поэтому в рамках программ энергосбережения, которые являются основным инструментом повышения энергетической эффективности, данному направлению уделяется особое внимание. Согласно отраслевой статистике, даже такие меры, как применение в ПРГ оборудования с увеличенными сроками между обслуживанием, вносят свой, пусть и не самый крупный, но стабильный вклад в общую экономию ресурсов, составляя порядка 1.9–2.9% от общего эффекта программ [2]. Эта экономия формируется за счет сокращения числа операций, связанных с остановкой подачи газа, таких как продувка технологических линий при вводе в ремонт, настройка арматуры и проверка её срабатывания.

Фундаментом для перехода на продленные межремонтные интервалы служат современные инженерные решения и материалы. Речь идет о применении регуляторов давления, запорной и предохранительной арматуры нового поколения. Ключевую роль играет

использование современных уплотнительных материалов, таких как композиционные уплотнители из терморасширенного графита на армирующей основе, которые существенно превосходят по упругим свойствам традиционные паронитовые прокладки и обеспечивают долговременную герметичность фланцевых и сальниковых соединений [3]. Применение приварной арматуры, максимальная замена стальных трубопроводов на полиэтиленовые, которые не подвержены коррозии, и использование устройств выхода газопроводов из земли (УВГЗ) – все это системные меры, минимизирующие точки потенциальных утечек и создающие основу для увеличения межсервисных периодов [3]. Как показывают отраслевые наработки, ярким примером специализированного решения может служить инновация АО «Газпром газораспределение Уфа», разработавшее устройство для настройки предохранительных клапанов без сброса газа в атмосферу [2]. Распространение подобных решений напрямую способствует экономии ресурса при проведении регламентных работ.

Однако истинный потенциал такого оборудования раскрывается в синергии с системами непрерывного мониторинга и телемеханики, внедрение которых также является отдельным пунктом программ энергосбережения [2]. Установка датчиков, отслеживающих ключевые параметры, и интеграция ПРГ в единую систему диспетчеризации позволяют перейти от планово-предупредительного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию. Для контроля труднодоступных участков все большее значение приобретают дистанционные высокочувствительные приборы, в том числе размещаемые на квадрокоптерах, позволяющие обнаружить утечку метана на расстоянии [3]. Это не только минимизирует непродуктивные визиты ремонтных бригад, но и кардинально снижает риск внезапных аварийных отказов, повышая общую надежность и безопасность системы газоснабжения.

Важно отметить, что нормативная база поддерживает данный тренд. Согласно п. 8.2.3 ГОСТ 34741–2021, периодичность технического обслуживания ПРГ может устанавливаться в соответствии с документацией изготовителей [4]. Таким образом, если производитель указывает в паспорте увеличенный межсервисный интервал (например, 5-8 лет для современных ГРПШ или даже 20 лет для некоторых бытовых регуляторов без необходимости обслуживания), это становится легитимной практикой [3]. Принцип «событие – следствие» в закольцованных сетях, где защитная арматура (ПЗК) настраивается на срабатывание раньше предохранительной (ПСК), также способствует снижению выбросов и повышению надежности, минимизируя необходимость частых вмешательств [3].

Экономический эффект от такого перехода носит многогранный характер. Прямая экономия формируется за счет сокращения затрат на частые выезды, уменьшения расхода запасных частей и, что критически важно, снижения объемов технологических потерь природного газа. Косвенный эффект включает в себя минимизацию выбросов при ремонтных работах благодаря использованию оборудования для врезки под давлением и современных методов ремонта, таких как применение композитных муфт без остановки газоснабжения [3]. В более широком смысле повышается операционная эффективность: оптимизируется график работы персонала, снижается количество оперативных переключений. Для газораспределительных организаций, которые сталкиваются с вызовами финансирования масштабных программ, такие точечные, но кумулятивные меры по сокращению эксплуатационных расходов являются важным ресурсом для повышения финансовой устойчивости [2].

Таким образом, применение в ПРГ оборудования с увеличенными межсервисными интервалами – это не просто техническая модернизация, а стратегический элемент комплексного подхода. Он объединяет передовые материалы, инновационное оборудование, цифровой мониторинг и адаптивное нормативное регулирование для создания «интеллектуального» и экономичного актива. Этот актив не только снижает эксплуатационное бремя и минимизирует потери ресурса, но и вносит существенный вклад в повышение уровня безаварийного и экологичного газоснабжения потребителей, что полностью отвечает духу и букве законодательства об энергосбережении.

Список литературы

1. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : федер. закон от 23 нояб. 2009 г. № 261-ФЗ (ред. от 23.06.2024) // Собрание законодательства РФ. – 2009. – № 48. – Ст. 5711.
2. Власичев С. В. Повышение энергоэффективности деятельности газораспределительных организаций / С. В. Власичев. – Текст : электронный // Газовая промышленность. – 2017. – № 1 (747). – С. 56–60. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-energoeffektivnosti-deyatelnosti-gazoraspredelitelnyh-organizatsiy/viewer> (дата обращения 05.02.2026).
3. Рогачев А. Г. Применяемые технологии, материалы и оборудование – факторы влияния на снижение объемов потерь газа / А. Г. Рогачев, Д. Е. Рыбкин. – Текст : электронный // Газовая промышленность. – 2017. – Спецвыпуск № 2 (770). – С. 44–51. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenyaemye-tehnologii-materialy-i-oborudovanie-factory-vliyaniya-na-snizhenie-obemov-poter-gaza/viewer> (дата обращения 05.02.2026)
4. ГОСТ 34741-2021 Системы газораспределительные. Требования к эксплуатации сетей газораспределения природного газа : дата введения 2022-06-01. – Москва.: ФГБУ «РСТ», 2021. – 114 с. – Текст : непосредственный.

УДК 697.0

Лисконог Михаил Иванович,
магистрант гр. ТГВм-55а;
Шацков Артем Олегович,
к.т.н., доцент каф. ТТГВ,
ДОННАСА - филиал НИУ МГСУ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ

Статья посвящена исследованию в области повышения эффективности и надежности теплоснабжения путем использования тепловых насосов. Эффективность теплоснабжения является ключевым фактором устойчивого развития городов и регионов. Современные технологии предлагают инновационные решения, среди которых особое место занимают тепловые насосы. Эти устройства позволяют значительно снизить затраты на отопление, повысить энергоэффективность и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду. Для выхода из сложившейся ситуации необходимо внедрять современные энергосберегающие технологии, такие как тепловые насосы. Они обеспечивают эффективное использование возобновляемых источников энергии, снижают нагрузку на традиционные системы отопления и уменьшают выбросы парниковых газов. Государственная поддержка программ модернизации теплосетей и популяризация экологически чистых технологий помогут ускорить переход к более эффективному и устойчивому теплоснабжению.

Ключевые слова: теплоснабжение, тепловые насосы, теплообмен, технологическая надёжность, теплонасосные установки, универсальность, экономичность, безопасность, доступность, автономность.

Проблема энергоэффективности систем отопления актуальна во многих регионах мира. Основные вызовы включают высокие затраты на топливо, потери энергии при транспортировке теплоносителя и устаревшие технологии.

Пути решения проблемы:

- Модернизация оборудования и внедрение энергосберегающих технологий;
- Использование возобновляемых источников энергии (тепловые насосы, солнечные коллекторы);
- Оптимизация режимов эксплуатации отопительных систем.

Тепловые насосы становятся все более популярными как эффективный способ повышения энергоэффективности систем отопления. Они позволяют использовать низкопотенциальное тепло из окружающей среды (воздуха, воды, грунта), преобразуя его в высокоэффективную тепловую энергию для обогрева помещений. Для внедрения таких решений необходимо учитывать климатические условия региона, тип здания и доступность источников тепла. Тепловой насос может стать отличным решением для модернизации существующих систем теплоснабжения, обеспечивая комфорт и экономию ресурсов одновременно.

Уникальность применения тепловых насосов в теплоснабжении заключается в нескольких аспектах: 1 аспект - Универсальность. Тепловые насосы могут работать как в режиме теплоснабжения объекта в холодное время, так и в режиме хладоснабжения — в жаркое время года (кондиционирование помещений). 2-ой - Экономичность. Для отопления дома с помощью тепловых насосов не нужно топливо. Для работы оборудования нужно только электричество, потребляемое компрессором системы. Высокий уровень КПД (соотношение полученной энергии к затраченной) может достигать 500–600%. 3 аспект - Безопасность. Тепловые насосы работают без открытого горения и большой нагрузки на электрическую сеть.

Теплоноситель в каждом из контуров не нагревается выше 70 градусов. 4-ый аспект - Доступность. Тепловые насосы можно использовать везде, где есть доступ хотя бы к одному из источников энергии: земле, воде, воздуху. 5-ый аспект - Автономность. Тепловые насосы оснащаются современной автоматикой и после настройки могут работать в автономном режиме. Работоспособность такой системы почти не зависит от температуры и климатических условий. И последний 6-ой аспект это - Многозадачность. В отличие от классического отопительного оборудования, тепловые насосы могут выполнять задачи обогрева, подготовки воды для системы горячего водоснабжения и кондиционирования дома [1].

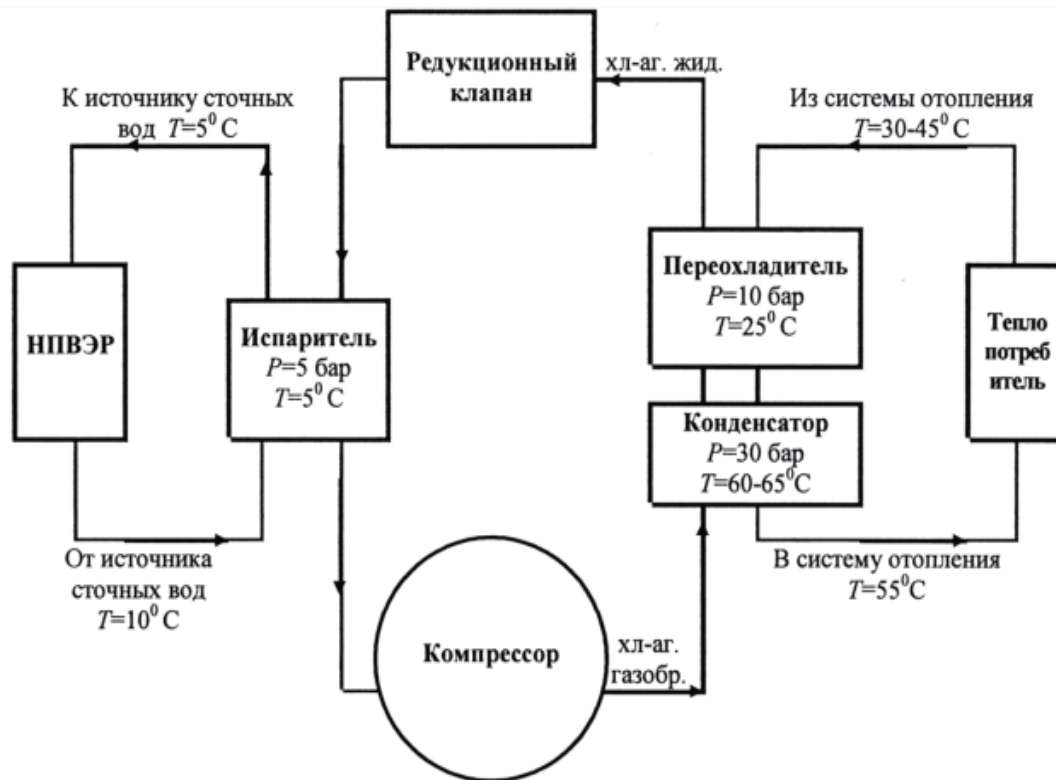


Рисунок 1 – Принципиальная схема теплового насоса

Процесс теплообмена начинается с того момента, когда охлажденный теплоноситель (рисунок 1), проходя по трубопроводу, уложенному в водную среду, например, сточные воды, нагревается на несколько градусов. В теплообменнике ТН, называемом испарителем, теплоноситель отдает отобранную из сточных вод теплоту во внутренний контур ТН, заполненный хладагентом (например, тетрафторэтан CH_2F-CF_3 с температурой в критической точке – 101,08°C и давлением – 40,6 бар, не оказывающий влияния на озоновый слой), который, проходя через испаритель, изменяет свое агрегатное состояние, превращаясь из жидкого в газообразный. Это происходит при низких давлениях и температуре. Из испарителя газообразный хладагент попадает в компрессор, где он сжимается до высокого давления, и его температура повышается.

При проектировании и реконструкции современных систем теплоснабжения необходимо учитывать возможность использования технологии тепловых насосов. Опыт зарубежных стран со сходными климатическими условиями, такими как Швеция, Финляндия, Германия и т.д. доказывает целесообразность применения тепловых насосов в условиях Северо-Западного региона нашей страны для различных нужд [2].

Повышение эффективности тепловых насосов за счет совершенствования их рабочих циклов и схем составляет основу современных исследований. В целом термодинамическое совершенство обратных циклов тепловых насосов в значительной степени определяет технико-экономическую и экологическую эффективность.

Для систем теплоснабжения, использующих тепловые насосы, традиционные радиаторы не подходят, т.к. они рассчитаны на температуру горячей воды от 95 до 105 °С. При таких параметрах уменьшение расчетной температуры в системе связано с резким увеличением поверхности отопительных приборов [3].

К недостаткам тепловых насосов, работающих за счет вторичный энергоресурсов и используемых для отопления, следует отнести большую стоимость установленного оборудования, необходимость сложного и дорогого монтажа подводимых теплообменных контуров. Общим недостатком тепловых насосов является сравнительно низкая температура нагреваемой воды, в большинстве случаев она находится в пределах +50°С ... +60°С градусов, причем чем эта температура выше, тем меньше его эффективность и надежность самого теплового насоса. Необходимо отметить, что в мировой практике подавляющее большинство тепловых насосов – парокомпрессионные, которые различаются между собой по термодинамическим циклам: Стирлинга, Ренкина, Брайтона и иных, а также по типу входящих в их состав компрессоров, например: поршневые, винтовые и турбокомпрессионные. Далее различие может быть и по степени герметичности: герметичные, сальниковые и бессальниковые. Источник приводит данные тепловых насосов, выпускаемые серийно, либо по отдельным заказам отечественными производителями. Повышение надёжности газораспределительной системы – это огромная работа, обеспечиваемая комплексным подходом реализации целого ряда мероприятий.

Тепловые насосы (ТН) или теплонасосные установки (ТНУ) как технология, позволяющая частично вытеснить органическое топливо и обеспечить теплоснабжение с минимальными затратами первичной энергии, находится в центре внимания зарубежных и отечественных исследователей и промышленных фирм. Страны Европы и Америки более 30 лет применяют ТНУ для теплоснабжения жилых и офисных зданий и помещений. Массовое использование тепловых насосных установок началось после энергетического кризиса 70 -х годов прошлого столетия.

Степень развития топливно- энергетического комплекса в большой степени определяет и будущее экономики Российской Федерации. Рост экономики предполагает увеличение объема производимых товаров и услуг, которое потребует опережающего развития всех сфер топливно-энергетического комплекса. Объективная ограниченность запасов невозобновляемых ископаемых топливных ресурсов, как основного сырья для топливно-энергетического комплекса, вызвало необходимость использования мероприятий по энергосбережению и энергоэффективности [4].

Работа теплового насоса осуществляется посредством, подведенной в компрессор работы, привод компрессора может осуществляться от электрического или теплового двигателя (рисунок 2). В компрессоре при сжатии хладагента повышается давление и температура рабочего вещества, находящегося в парообразном состоянии от давления p_1 до давления p_2 . Затем в конденсаторе горячий газообразный хладагент конденсируется при постоянном давлении. Полученное при конденсации тепло передается потребителю при температуре T_2 , например, для нагрева воды, направляемой в систему отопления. В редукционном клапане (дросселе) происходит расширение рабочего вещества до давления p_1 с его частичным испарением. Далее, хладагент полностью превращается в пар при температуре T_1 в испарителе, где отбирается теплота от источника низкопотенциального тепла, например от сточных или канализационных вод, нагретого вентиляционного воздуха или продуктов сгорания и т.д. И так цикл продолжается [5].

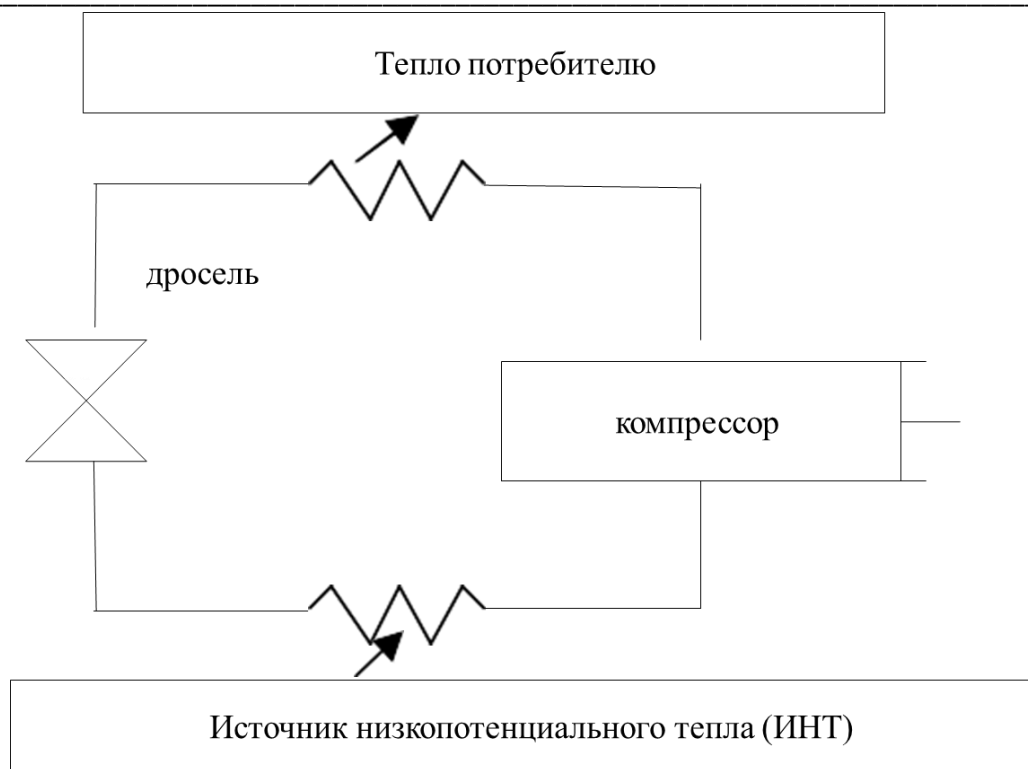


Рисунок 2 – Схема парокомпрессионного теплового насоса

По прогнозам Мирового энергетического комитета, к 2030 году в 75 % всех систем теплоснабжения в развитых странах будут использоваться тепловые насосы. В России мощность установленных тепловых насосов всех типов не превышает 65 МВт, что делает в условиях экономического курса страны на энергосбережение и энергоэффективность актуальными исследования в этой сфере.

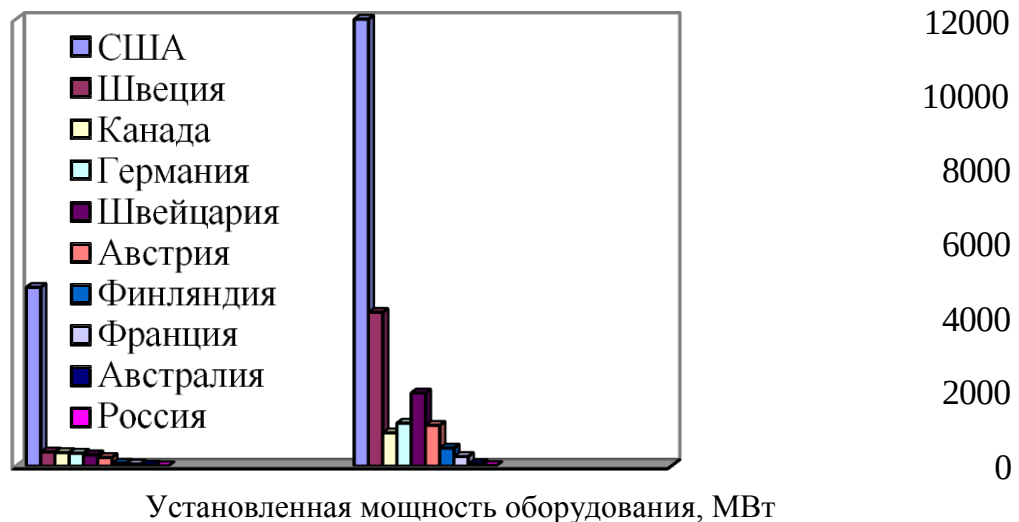


Рисунок 3 – Сравнительная диаграмма стран, занимающее лидирующее положение, использующих тепловую энергию земли посредством ТН

Лидерами по применению тепловых насосных установок являются США и Швеция, также большое количество тепловых насосных установок установлено в Германии, Швейцарии, Австрии, Канаде (рисунок 3).

На основе вышеизложенного можно сделать вывод: тепловые насосы представляют собой естественный природный источник тепловой энергии, который имеет как экономические, так и экологические преимущества по сравнению с традиционными системами, использующими только углеродосодержащее топливо. В ходе данной научно-исследовательской работы были рассмотрены и изучены основные типы теплонасосных установок и источники низкопотенциальной энергии, а также конструкция и принцип действия теплового насоса, определены основные положения для проектирования систем теплоснабжения с использованием тепловых насосов, проведен сравнительный анализ экономической целесообразности, эффективности работы, безопасности эксплуатации при использовании различных генераторов тепловой энергии. Имеющийся опыт использования зарубежных тепловых насосов для нужд теплоэнергетики РФ требует соответствующей адаптации в соответствии с реальными климатическими условиями.

Список литературы

1. Даутов Р. Р. Модернизация системы теплоснабжения с применением теплового насоса / Р. Р. Даутов // Тинчуринские чтения – 2021 «Энергетика и цифровая трансформация» / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. – Казань. – 2021. – С. 114-116. EDN: ХІККУІ
2. Хрилев Л.С., Калнинь И.М., Козлов Б.М., Рябчиков И.В. Внедрение теплонасосных установок – важная народнохозяйственная задача (по итогам конкурса ГКПТ СССР) // Теплоэнергетика. – 1992. № 4. С. 20– 23.
3. Проценко В.П. Тепловые насосы в капиталистических странах. Современное состояние и направления развития (по материалам XIII Мировой энергетической конференции)//Теплоэнергетика. 1988. №3. С.70– 73.
4. А. Ю. Петин Тепловые насосы в теплоснабжении // Новости теплоснабжения.-2001. № 11. С. 42-43.
5. Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети: Учебник для ВУЗов // М. - Издательство МЭИ. - 1999.- 472 с.

УДК 697.7

Грешной Евгений Алексеевич,
магистрант гр. ТГВм-55а;
Шам Сергей Сергеевич,
магистрант гр. ЗТГВМ-55б;
Шацков Артем Олегович,
к.т.н., доцент каф. ТТГВ,
ДОННАСА-филиал НИУ МГСУ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМ ГАЗОВОГО ИНФРАКРАСНОГО ОБОГРЕВА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

В условиях роста цен на энергоносители и ужесточения требований к энергоэффективности промышленных объектов проблема оптимизации систем обогрева производственных помещений приобретает особую актуальность. Газовые инфракрасные системы обогрева демонстрируют значительный потенциал энергосбережения по сравнению с традиционными конвективными методами отопления. Настоящая статья рассматривает комплекс технических и организационных мероприятий, направленных на повышение эффективности работы газовых инфракрасных обогревателей в производственных зданиях. Проанализированы современные подходы к оптимизации режимов работы оборудования, представлены результаты внедрения энергоэффективных решений на российских предприятиях. Особое внимание уделено вопросам автоматизации управления системами обогрева и интеграции инфракрасных технологий в общую концепцию «умного» промышленного объекта. Результаты исследования позволяют сформулировать практические рекомендации по модернизации существующих систем отопления производственных зданий.

Ключевые слова: газовые инфракрасные обогреватели, энергоэффективность, производственные здания, системы отопления, промышленная теплотехника, оптимизация энергопотребления, инфракрасное излучение.

Газовые инфракрасные системы обогрева представляют собой принципиально иную концепцию теплоснабжения производственных помещений по сравнению с традиционными конвективными методами. Принцип их работы основан на прямом лучистом теплообмене между излучающей поверхностью обогревателя и объектами в рабочей зоне, что позволяет исключить энергетические потери на нагрев большого объема воздуха [4].

Согласно исследованиям российских специалистов, эффективность газовых инфракрасных обогревателей в производственных зданиях высотой более 6 метров превышает показатели традиционных систем отопления на 35-50% [6]. Это объясняется физикой процесса: инфракрасное излучение нагревает не воздух, а непосредственно поверхности оборудования, конструкций и людей, находящихся в зоне облучения. Воздух же нагревается вторично, от нагретых поверхностей, что минимизирует конвективные потоки и связанные с ними теплопотери через верхнюю зону помещения.

Практика применения газовых инфракрасных систем на российских промышленных предприятиях демонстрирует следующие ключевые преимущества:

- снижение энергопотребления на отопление на 30-60% по сравнению с воздушными системами;
- сокращение времени выхода на рабочий температурный режим до 15-20 минут;
- возможность зонального обогрева только рабочих участков производственного помещения;
- минимизация вертикального температурного градиента;
- отсутствие циркуляции пыли и вредных веществ;

- высокая степень автоматизации управления тепловым режимом;
- компактность оборудования и простота монтажа.

Современные газовые инфракрасные обогреватели производства российских компаний демонстрируют КПД на уровне 92-96%, что обеспечивает практически полное преобразование энергии сгорания газа в полезное тепловое излучение [2]. При этом удельный расход топлива составляет от 0,8 до 1,2 м³ природного газа на 1 кВт тепловой мощности в час, что существенно ниже показателей традиционных котельных установок.

Особую значимость газовые инфракрасные системы приобретают для объектов с высокими производственными помещениями: складов, логистических терминалов, сборочных цехов, ангаров. В таких зданиях традиционные системы отопления создают значительный вертикальный градиент температур, при котором теплый воздух скапливается под потолком, а в рабочей зоне сохраняется некомфортная температура. Инфракрасные обогреватели полностью решают эту проблему, создавая комфортный микроклимат именно на уровне рабочих мест [7].

Повышение эффективности газовых инфракрасных систем обогрева достигается комплексом технических и организационных мероприятий, охватывающих все этапы проектирования, монтажа и эксплуатации оборудования. Современный подход к оптимизации предполагает не только правильный подбор оборудования, но и создание интеллектуальной системы управления тепловым режимом производственного здания.

Ключевым фактором эффективности является правильное проектирование системы, включающее расчет оптимального количества обогревателей, их мощности и высоты размещения. Исследования показывают, что высота установки инфракрасных обогревателей оказывает существенное влияние на равномерность теплового поля и энергетическую эффективность системы [5]. Оптимальная высота размещения для светлых газовых инфракрасных обогревателей составляет 4-12 метров, для темных — 6-16 метров в зависимости от мощности излучателя.

Современные технологии управления позволяют реализовать следующие режимы работы инфракрасных систем:

- программируемое суточное регулирование с учетом графика работы предприятия;
- зональное управление с различными температурными режимами для разных участков производства;
- автоматическая корректировка режима работы при изменении наружной температуры;
- адаптивное управление на основе данных о фактической загруженности производственных зон;
- интеграция с системами вентиляции для оптимизации общего энергобаланса здания.

Значительный потенциал энергосбережения заключается в применении современных систем автоматизации с использованием контроллеров и датчиков температуры, присутствия, освещенности [3]. Внедрение таких систем на российских предприятиях позволяет дополнительно снизить энергопотребление на 15-25% за счет исключения работы обогревателей в период отсутствия персонала и автоматической оптимизации режимов в зависимости от реальных потребностей.

Важным аспектом повышения эффективности является правильная организация воздухообмена в обогреваемом помещении. Чрезмерная вентиляция может нивелировать энергетические преимущества инфракрасного обогрева, тогда как недостаточный воздухообмен создает проблемы с качеством воздушной среды. Оптимальное решение — интеграция систем инфракрасного обогрева с механической приточно-вытяжной вентиляцией, оснащенной рекуперацией тепла [1].

Модернизация существующих систем может включать:

- замену устаревших обогревателей на современные высокоэффективные модели;
- установку систем автоматического управления и мониторинга;

- оптимизацию расположения излучателей с учетом реальной планировки производства;
- интеграцию с системами учета энергоресурсов;
- установку экранов и отражателей для направленного теплового излучения;
- применение систем предварительного прогрева газозвдушной смеси.

Перспективным направлением является использование цифровых двойников производственных зданий для моделирования тепловых режимов и оптимизации параметров систем обогрева. Такой подход позволяет еще на этапе проектирования определить оптимальную конфигурацию системы и режимы её работы для конкретного объекта.

Анализ результатов внедрения газовых инфракрасных систем обогрева на промышленных предприятиях России демонстрирует их высокую экономическую эффективность и быструю окупаемость инвестиций. Практика показывает, что срок окупаемости проектов по модернизации систем отопления производственных зданий с переходом на инфракрасные технологии составляет от 1,5 до 4 лет в зависимости от региона, типа производства и исходной системы теплоснабжения.

На одном из промышленных предприятий Московской области внедрение системы газового инфракрасного обогрева в сборочном цехе площадью 3200 м² позволило сократить годовое потребление тепловой энергии с 520 до 215 Гкал, что составило экономию 58,5% [4]. При этом инвестиции в оборудование и монтаж составили 2,8 млн рублей, а срок окупаемости при текущих тарифах на газ — 2,3 года.

Особенно впечатляющие результаты достигаются при модернизации систем отопления в высоких производственных помещениях. На логистическом комплексе в Ленинградской области замена воздушного отопления на инфракрасное в складском здании высотой 12 метров обеспечила снижение энергопотребления на 64% при одновременном повышении комфортности условий труда [6].

Российский опыт внедрения инфракрасных систем позволяет выделить типовые показатели экономической эффективности:

- снижение расхода газа на 35-65% в зависимости от типа здания и исходной системы;
- сокращение эксплуатационных затрат на 40-70% за счет снижения энергопотребления и затрат на обслуживание;
- уменьшение первоначальных капитальных вложений на 20-30% по сравнению с традиционными системами водяного отопления;
- снижение выбросов парниковых газов на 30-50% на единицу обогреваемой площади;
- повышение производительности труда на 3-7% за счет улучшения комфортности рабочих мест.

Исследования показывают, что максимальная эффективность инфракрасных систем достигается при комплексном подходе к энергосбережению, включающем утепление ограждающих конструкций, модернизацию систем вентиляции и внедрение автоматизированных систем управления микроклиматом [2]. На предприятиях, реализовавших такой комплексный подход, общее снижение энергопотребления на отопление достигает 70-75%.

Важным фактором эффективности является правильная эксплуатация и техническое обслуживание систем. Регулярная очистка излучающих поверхностей, настройка горелочных устройств, калибровка систем автоматики позволяют поддерживать заявленные производителем характеристики оборудования на протяжении всего срока службы [7].

Практика показывает, что наибольший экономический эффект достигается на объектах со следующими характеристиками:

- высота производственных помещений от 6 метров;
- наличие локальных рабочих зон, требующих зонального обогрева;
- непостоянный режим работы с возможностью периодического отключения отопления;

- необходимость быстрого прогрева после длительных перерывов;
- высокая интенсивность воздухообмена или частое открывание ворот.

Перспективы развития газовых инфракрасных систем в России связаны с ростом требований к энергоэффективности промышленных объектов, повышением стоимости энергоносителей и развитием технологий «умных» зданий. Современные тенденции показывают движение к созданию полностью автоматизированных систем теплоснабжения, интегрированных в общую систему управления предприятием и способных адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации в реальном времени [3].

Список литературы

1. Kobelev N., Emelyanov S., Kretova V., Morzhavin A., Amelin V., Kobelev V. Energy-saving Solution in the Heating System of Buildings. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 117, pp. 186–190.
2. Максимов В. И., Нагорнова Т. А., Куриленко Н. И., Волошко И. В. Анализ преимуществ систем обеспечения теплового режима локальных рабочих зон на основе газовых инфракрасных излучателей по сравнению с традиционными конвективными системами отопления // *Известия ТПУ*. 2021 – №9. – С. 128-139.
3. Ким, Е. С. Проектирование промышленной сети контроллеров для автоматизации тепловых коммуникаций зданий / Е. С. Ким, А. А. Копесбаева, М. Ю. Мачковский. — Текст : непосредственный // *Молодой ученый*. — 2020. — № 19 (309). — С. 33-38.
4. Кашкаров, А. П. Современные обогреватели: типы, расчет мощности, ремонт – для дома, офиса и не только / А. П. Кашкаров. — 2-е изд. — Москва : ДМК Пресс, 2023. — 152 с. — ISBN 978-5-89818-399-8. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/159324.html> (дата обращения: 11.03.2026). — Режим доступа: для авторизир. пользователей
5. Свинцов, А. П. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха : учебное пособие / А. П. Свинцов. — Москва, Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. — 148 с. — ISBN 978-5-9729-1389-3.
6. Smykov A.A. Thermal regime of external enclosing constructions in buildings with lumid heating systems based on infrared radiators. *Science. Thought: electronic periodic journal*, 2017, no. 5, pp. 5–8.
7. Бодров М. В., Смыков А. А., Морозов М. С. Системы лучистого отопления на базе водяных инфракрасных излучателей для текстильной промышленности // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. — 2020. — № 6 (390). — С. 168-174.

УДК 536.24

Леонтьев Александр Александрович,
магистрант гр. ЗТГВм-56а;
Попов Константин Дмитриевич,
магистрант гр. ЗТГВМ-55а;
Шацков Артем Олегович,
к.т.н., доцент каф. ТТГВ,
ДОННАСА-филиал НИУ МГСУ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЗА СЧЕТ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА

В условиях роста тарифов на энергоносители и ужесточения требований к энергосбережению особое значение приобретают современные методы интенсификации теплообмена, направленные на снижение энергозатрат и повышение экономической эффективности теплоснабжающих организаций. В работе анализируются перспективные технические решения, включая использование турбулизаторов потока, развитых (профилированных) поверхностей нагрева, а также введение наночастиц в теплоносители. Особое внимание уделяется адаптации данных методов к специфике российских систем теплоснабжения с учётом климатических условий, особенностей эксплуатации и конструктивных характеристик оборудования. Исследование направлено на выявление наиболее эффективных подходов к модернизации теплообменного оборудования и оценку потенциала их практического применения.

Ключевые слова: теплообменные аппараты, интенсификация теплообмена, энергоэффективность, системы теплоснабжения, турбулизация потока, коэффициент теплоотдачи, модернизация теплового оборудования.

Системы централизованного теплоснабжения России сталкиваются с критическими вызовами, связанными с износом оборудования и необходимостью снижения энергетических затрат. По данным Минэнерго РФ, более 60% теплообменных аппаратов эксплуатируются свыше 25 лет, что существенно снижает их эффективность [3]. Износ теплообменного оборудования приводит к увеличению расхода топлива на 15-20% и росту тепловых потерь в сетях.

Актуальность проблемы усиливается в контексте государственной политики энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Федеральный закон № 261-ФЗ устанавливает конкретные требования по снижению энергоёмкости производства тепловой энергии. Согласно «Энергетической стратегии России до 2035 года», необходимо достичь сокращения удельного расхода топлива на выработку тепла не менее чем на 10% по сравнению с показателями 2020 года [5].

Теплообменные аппараты представляют собой ключевой элемент систем теплоснабжения, определяющий общую эффективность теплопередачи. В современных условиях эксплуатации они должны обеспечивать:

- максимальный коэффициент теплопередачи при минимальных габаритах;
- низкое гидравлическое сопротивление для снижения затрат на перекачку теплоносителя;
- устойчивость к загрязнениям и отложениям;
- длительный срок службы без существенного снижения характеристик;
- экономическую целесообразность модернизации или замены.

Исследования показывают, что традиционные конструкции теплообменников используют лишь 50-70% своего потенциала теплопередачи из-за ламинарного или

переходного режима течения теплоносителя [7]. Это создает значительный резерв для повышения эффективности за счет применения методов интенсификации теплообмена.

Экономический аспект проблемы чрезвычайно важен для теплоснабжающих организаций. При текущих тарифах на энергоресурсы окупаемость модернизации теплообменного оборудования с применением интенсификаторов составляет 2-4 года. Внедрение эффективных теплообменных аппаратов позволяет снизить операционные издержки на 12-18%, что критично для финансовой устойчивости предприятий жилищно-коммунального хозяйства [6].

Специфика российских систем теплоснабжения определяется суровыми климатическими условиями большей части территории страны. Продолжительный отопительный сезон (от 180 до 270 дней в различных регионах) предъявляет повышенные требования к надежности и эффективности теплообменного оборудования. Даже незначительное снижение эффективности на 5-7% в масштабах страны приводит к перерасходу топлива на миллиарды рублей ежегодно.

Интенсификация теплообмена представляет собой комплекс технических решений, направленных на увеличение коэффициента теплоотдачи без пропорционального роста гидравлического сопротивления. Базовые принципы интенсификации основаны на управлении гидродинамическими и тепловыми процессами в пограничном слое теплоносителя.

Турбулизация потока является наиболее распространенным методом интенсификации. Установка в каналах теплообменника специальных вставок – турбулизаторов – разрушает ламинарный пограничный слой, увеличивая перенос тепла от стенки к ядру потока. Современные исследования демонстрируют, что правильно спроектированные турбулизаторы повышают коэффициент теплоотдачи на 30-50% при увеличении гидравлического сопротивления всего на 20-35% [1].

Различают несколько типов турбулизирующих вставок:

- винтовые ленточные завихрители, создающие закрученное движение потока;
- поперечные выступы и канавки на теплопередающей поверхности;
- проволочные турбулизаторы, устанавливаемые вдоль канала;
- перфорированные вставки, формирующие струйное обтекание;
- комбинированные системы, сочетающие несколько принципов воздействия.

Исследования, проведенные в Казанском государственном энергетическом университете, показали, что оптимальная геометрия турбулизаторов зависит от режима течения и теплофизических свойств теплоносителя [4]. Для воды при числах Рейнольдса 3000-10000 максимальная эффективность достигается при использовании винтовых завихрителей с относительным шагом витка 3-5 диаметров трубы.

Развитие поверхности теплообмена – второе направление интенсификации, основанное на увеличении площади контакта теплоносителя с нагреваемой или охлаждаемой поверхностью. Применяются:

- оребрение внутренних и наружных поверхностей труб;
- микроструктурирование поверхности (микроканавки, пористые покрытия);
- применение труб с внутренним профилированием;
- использование компактных поверхностей с высокой удельной площадью.

В работе [6] отмечается, что эффективность оребрения существенно зависит от теплопроводности материала ребер и их геометрических характеристик. Для алюминиевых ребер при высоте 10-15 мм и шаге 2-3 мм удастся увеличить теплопередачу в 2,5-3 раза по сравнению с гладкой трубой.

Наноструктурированные теплоносители (нанофлюиды) представляют инновационное направление интенсификации. Добавление в воду или другие теплоносители наночастиц металлов (медь, алюминий), оксидов (Al_2O_3 , TiO_2 , CuO) или углеродных материалов (нанотрубки, графен) приводит к повышению теплопроводности жидкости на 10-40% [2].

Механизмы повышения эффективности при использовании нанофлюидов включают:

- увеличение теплопроводности теплоносителя за счет высокой теплопроводности наночастиц;
- интенсификацию броуновского движения частиц, усиливающего конвективный перенос;
- формирование упорядоченных структур наночастиц у поверхности теплообмена;
- изменение режима течения и турбулизацию пристенного слоя.

Экспериментальные исследования продемонстрировали увеличение коэффициента теплоотдачи на 25% при добавлении 1% объемной концентрации наночастиц оксида меди в воду [7]. Однако применение нанофлюидов в промышленных масштабах ограничено высокой стоимостью наноматериалов и проблемами стабилизации суспензий.

Вибрационное воздействие на теплообменные поверхности создает дополнительную турбулизацию и разрушение застойных зон. Низкочастотные колебания (20-100 Гц) с амплитудой 0,5-2 мм способны увеличить теплоотдачу на 15-25%. Однако данный метод требует дополнительных энергозатрат и усложнения конструкции теплообменника.

Комбинированные методы интенсификации, сочетающие несколько принципов одновременно, демонстрируют синергетический эффект. Например, применение оребренных труб с турбулизирующими вставками позволяет достичь увеличения коэффициента теплопередачи в 3-4 раза при приемлемом росте гидравлического сопротивления [4]. Выбор метода интенсификации определяется конкретными условиями эксплуатации теплообменника: температурными режимами, свойствами теплоносителей, допустимыми гидравлическими потерями, экономическими ограничениями. Для систем централизованного теплоснабжения наиболее перспективным представляется использование турбулизаторов и развитых поверхностей, обеспечивающих оптимальное соотношение эффективности и стоимости.

Внедрение методов интенсификации теплообмена в реальных системах теплоснабжения требует комплексного подхода, учитывающего технические, экономические и эксплуатационные аспекты. Российский опыт модернизации теплообменных аппаратов демонстрирует высокую эффективность различных технических решений.

Пластинчатые теплообменники с гофрированными пластинами представляют современную альтернативу традиционным кожухотрубным аппаратам. Их компактная конструкция и развитая поверхность теплообмена обеспечивают коэффициент теплопередачи в 3-5 раз выше, чем у трубчатых теплообменников аналогичной мощности [3]. Применение пластинчатых аппаратов в тепловых пунктах позволяет:

- сократить габариты оборудования на 50-70%;
- снизить объем теплоносителя в системе на 80-90%;
- упростить обслуживание и очистку поверхностей;
- обеспечить гибкость наращивания теплопроизводительности.

В Санкт-Петербурге реализован проект модернизации 150 центральных тепловых пунктов с заменой кожухотрубных теплообменников на пластинчатые. Результаты мониторинга показали снижение расхода сетевой воды на 12%, уменьшение тепловых потерь на 8% и сокращение эксплуатационных расходов на 15% [3].

Спиральные теплообменники находят применение в системах с загрязненными теплоносителями или при необходимости минимизации гидравлического сопротивления. Их конструктивные особенности обеспечивают эффект самоочищения поверхностей за счет турбулентного течения и отсутствия застойных зон.

Модернизация существующих кожухотрубных теплообменников с установкой турбулизирующих вставок представляет экономически эффективное решение для предприятий с ограниченным бюджетом. Разработанные в России системы быстросъемных турбулизаторов позволяют:

- повысить коэффициент теплопередачи на 25-35%;
- сохранить возможность механической очистки труб;

- избежать полной замены дорогостоящего оборудования;
- окупить инвестиции за 1,5-2,5 года эксплуатации.

Опыт по внедрению винтовых турбулизаторов в подогревателях сетевой воды продемонстрировал увеличение теплопроизводительности на 28% без изменения расхода греющего пара [1]. Это позволило отказаться от приобретения дополнительного теплообменного оборудования и сэкономить около 45 млн рублей капитальных вложений.

Цифровизация управления теплообменными процессами открывает новые возможности оптимизации работы оборудования. Системы автоматического регулирования с использованием искусственного интеллекта позволяют:

- адаптировать режимы работы к изменяющимся условиям в реальном времени;
- прогнозировать загрязнение поверхностей и планировать профилактические очистки;
- минимизировать энергопотребление при сохранении требуемых параметров теплоснабжения;
- диагностировать неисправности на ранних стадиях развития.

Применение интеллектуальных систем управления на базе нейронных сетей в московской энергосистеме обеспечило снижение энергозатрат на транспорт теплоносителя на 9% и повышение надежности теплоснабжения [6].

Перспективные направления исследований в области интенсификации теплообмена включают:

- разработку биомиметических поверхностей, воспроизводящих микроструктуры природных объектов с высокой эффективностью теплопередачи;
- создание адаптивных теплообменников с изменяемой геометрией поверхности в зависимости от режима работы;
- применение аддитивных технологий для производства теплообменников оптимальной конфигурации;
- использование фазовых переходов и химических реакций для интенсификации теплопереноса;
- внедрение термоэлектрических эффектов для дополнительной рекуперации энергии.

Экономическая эффективность модернизации теплообменного оборудования определяется соотношением инвестиционных затрат и получаемой экономии энергоресурсов. Сравнительный анализ различных вариантов представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ различных вариантов интенсификации теплообмена

Тип модернизации	Рост эффективности, %	Капитальные затраты, тыс. руб./Гкал	Срок окупаемости, лет
1	2	3	4
Установка турбулизаторов	25-35	15-25	1,5-2,5
Замена на пластинчатые	60-80	45-70	3,5-5,0
Применение нанофлюидов	20-30	30-50	4,0-6,0
Комплексная модернизация	80-120	70-110	3,0-4,5

Государственная поддержка модернизации теплоэнергетики осуществляется через программы субсидирования, льготного кредитования и налоговых преференций. Федеральная программа «Энергоэффективная экономика» предусматривает софинансирование до 30% затрат на внедрение энергосберегающих технологий для предприятий ЖКХ [5].

Критическим фактором успешного внедрения инновационных решений является подготовка персонала и формирование культуры энергоэффективности. Обучение

специалистов современным методам эксплуатации и обслуживания высокоэффективного теплообменного оборудования обеспечивает реализацию заложенного потенциала экономии.

Таким образом, интенсификация теплообмена в аппаратах систем теплоснабжения представляет стратегически важное направление повышения энергоэффективности российской экономики. Анализ современных технических решений демонстрирует наличие апробированных методов, позволяющих увеличить эффективность теплопередачи на 25-120% при экономически обоснованных инвестициях.

Список литературы

1. Лепеш, Г. В., Лунева, С. К. Повышение эффективности теплообменных аппаратов // ТТПС. 2017 – №1 (39). – С. 42-56.
2. Слободина, Е. Н., Парамонов, А. М., Степашкин, И. А., Михайлов, А. Г. Экспериментальные и расчетные исследования процессов теплообмена при использовании наножидкостей // Известия Транссиба. – 2024. – №2 (58). – С. 100-107
3. Министерство энергетики Российской Федерации. Отчёт о состоянии теплоэнергетики и централизованного теплоснабжения в Российской Федерации в 2021 году. – М.: Минэнерго России, 2022. - 111 с.
4. Хурмаматов Абдугаффор Мирзабдуллаевич, Рахимов Ганишер Бахтиёрович, Муртазаев Ферузбек Истамович ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ // Universum: технические науки. 2021. – №11 (92). – 12-15.
5. Правительство Российской Федерации. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р. М., 2020.
6. Посашков М.В. Энергосбережение в системах теплоснабжения : учебное пособие / Посашков М.В., Немченко В.И., Титов Г.И.. — 2-е изд. — Самара : Самарский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2017. — 152 с.
7. Шимчук Н. А., Геллер В. З. Влияние различных факторов на теплопроводность нанофлюидов // ВЕЖПТ. 2014. – №11 (72). – С. 35-40.

УДК 699.86

Соленая Маргарита Дмитриевна,
студентка гр. ГЗ-214;
Рожков Игорь Николаевич,
ст. преп. каф. пожарная безопасности;
Родыгина Мария Михайловна,
к.т.н., доц. кафедры пожарной безопасности,
ФГБОУ ВО ЛГУ им. В.Даля

ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ ПЕРВЫХ МАССОВЫХ СЕРИЙ

Энергетическое обследование здания производится с целью определения эксплуатационной пригодности инженерных коммуникаций и строительных конструкций с точки зрения их соответствия теплотехническим и энергосберегающим нормам.

Энергетическое обследование зданий является одним из видов специальных обследований, которое производится для определения эксплуатационной пригодности инженерных коммуникаций и строительных конструкций с точки зрения их соответствия теплотехническим и энергосберегающим нормам. В статье систематизируется алгоритм проведения данного вида обследования.

Ключевые слова: энергетическое обследование, мониторинг технического состояния.

An energy survey of a building is performed in order to determine the operational suitability of engineering communications and building structures in terms of their compliance with heat and energy saving standards.

An energy survey of buildings is one of the types of special surveys that are performed in order to determine the operational suitability of engineering communications and building structures in terms of their compliance with heat and energy saving standards. The article systematizes the algorithm for conducting this type of survey.

Keywords: energy survey, technical condition monitoring.

Введение. Введение в действие новых теплотехнических требований, предъявляемых к ограждающим конструкциям зданий, регламентирующихся, СП 50.13330.2024 «Тепловая защита зданий» увеличение объемов потребления населением электроэнергии свидетельствуют о значительном моральном износе ограждающих конструкций и коммуникаций, существующих жилых и гражданских зданий времен массовой застройки [1].

Анализ опыта эксплуатации застройки показывает, что здания, построенные, в частности, в 50-70-е годы, имеют существенные недостатки, усложняющие использование их по назначению и удорожающие их техническое обслуживание и ремонт:

- тонкие стены, в том числе из трехслойных ребристых панелей, при которых затраты на отопление зданий возросли в 1,6 раза; недолговечные, негерметичные стыки панелей, требующие ремонта примерно через каждые пять лет;
- непригодные к ремонту, с низкими эксплуатационными качествами и дорогие по техническому обслуживанию и ремонту совмещенные крыши;
- недолговечные ограждающие конструкции в помещениях, в которых ведутся мокрые процессы из-за некачественного устройства их паро- и гидроизоляции;

Приведенные примеры несоответствия фактических эксплуатационных качеств нормативным усугубляют ситуацию и приводят к дополнительным тепловым потерям.

Изложение основного материала.

Тепловая эффективность здания, определяемая средним годовым расходом топлива на отопление и горячее водоснабжение одного квадратного метра общей площади, является важным показателем энергосбережения. В домах первых массовых серий такой показатель составляет 80-85 кг/м². Столь неблагоприятное положение связано с низкими теплозащитными качествами наружных ограждений (стен, окон, покрытий, перекрытий над неотапливаемыми подпольями и подвалами) эксплуатируемых зданий, несовершенством систем отопления, вентиляции и горячего водоснабжения [2].

Указанные выше недостатки особенно присущи жилым домам первых массовых серий, которые были построены в 1950-1960 годах, в эпоху индустриального развития СССР. В то время в стране началось активное строительство жилых домов секционного типа для посемейного заселения квартир. Учитывая ограниченность ресурсов, проектирование квартир велось в условиях жесткой экономии материальных средств. Проектными институтами были разработаны специально упрощенные проекты жилья массовых серий – панельные дома серии 1-464 и кирпичные дома серии 1-507. Общая площадь жилого фонда России, размещенного в 4-5 этажных домах первых массовых серий составляла более 250 млн. м² [4].

Мировой опыт дает основание утверждать, что реконструкция ветхого жилого фонда в экономическом отношении в ряде случаев выгоднее сноса и последующего нового строительства. В этой связи необходимо проведение объективного экономического анализа эффективности сноса и нового строительства или реконструкции ветхого жилого фонда. Модернизация зданий, находящихся в удовлетворительном состоянии, удовлетворяющем нормативы жилых требований, более экономично, чем снос и постройка новых [5].

Одним из этапов определения пригодности или непригодности здания для дальнейшей нормальной эксплуатации является его энергетическое обследование.

Некоторые цели энергетического обследования:

- выявление мест неэффективного расходования энергетических ресурсов. Помимо тепла и электричества, специалисты могут исследовать потребление газа, воды и прочего;
- оценка теплопотерь при отоплении, особенно в критических местах: дверных и оконных проемах, стыках панелей, кровле, трещинах, подвалах, местах выхода из стен инженерных коммуникаций;
- разработка перечня мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности и их стоимостная оценка;
- технико-экономическое обоснование оптимального решения реконструкции здания, отвечающего современным теплотехническим требованиям.

Энергетическое обследование включает в себя следующие виды обследований:

- теплотехническое обследование ограждающих конструкций;
- обследование внутренних инженерных сетей и инженерного оборудования;
- обследование систем электроснабжения и освещения.

Виды обследований, входящие в энергетическое обследование, выполняются независимо друг от друга с привлечением специализированных организаций соответствующего профиля [3].

По результатам данных, полученных при проведении энергетического обследования, принимается решение о необходимости модернизации инженерных сетей и системы электроснабжения здания, а также утепления или замены ограждающих конструкций, оконных и дверных заполнений.

Теплотехнические требования, предъявляемые к ограждающим конструкциям зданий, регламентируются СП 50.13330.2024 «Тепловая защита зданий» и зависят от вида ограждения (стена, покрытие, климатических условий района и функционального назначения здания).

Целью теплотехнических обследований ограждающих конструкций является выявление их фактических теплозащитных качеств и их соответствия современным нормативным требованиям, которые в последние годы существенно изменились в связи с проблемой экономии и рационального использования энергетических ресурсов.

Теплотехнические качества ограждающих конструкций характеризуются приведенными сопротивлениями: теплопередаче – R_0 м² °C/Вт, паропроницанию – R_n м² чПа/мг и воздухопроницанию – $R_{возд}$ м² ч/кг. Конструкция полов в помещениях с длительным пребыванием людей, кроме отмеченных показателей, характеризуется также показателем тепловой активности (теплоусвоения).

Основной задачей определения теплотехнических качеств ограждающих конструкций является:

- определение температурного поля на внутренних поверхностях ограждающих конструкций, на участках теплопроводных включений, узлов примыканий внутренних и наружных стен, стыковых соединений с целью выявления зон с пониженной температурой, где возможно образование конденсата на поверхности конструкций, установление характера изменения температурного поля и выявление степени теплотехнической неоднородности конструкций;

- определение термического сопротивления конструкций R_k м² °C/Вт, коэффициента теплоотдачи внутренней α в м² °C/Вт и наружной α_n м² °C/Вт, поверхностей;

- определение динамики влажностного режима конструкций в разные сезоны года, установление зоны конденсации влаги и степени влагонакопления в холодный период года, определение влажностного состояния стыковых соединений;

- обследование воздухопроницаемости стеновых конструкций, стыковых соединений и светопрозрачных конструкций.

Выводы. Энергетическое обследование является частью системы мониторинга технического состояния жилых и гражданских зданий, которая решает в рамках функциональной деятельности организации задачу обеспечения безопасной безаварийной эксплуатации зданий и сооружений. Решение такой задачи основано на мониторинге и оценке технического состояния строительных конструкций объектов, позволяющих фиксировать наступающее или наступившее ухудшение эксплуатационных характеристик и принять своевременные меры по предупреждению внештатных ситуаций.

Список литературы

1. СП 50.13330.2024. Тепловая защита зданий. — Введ. 2025-07-01. — (Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003).
2. СП 23.101.2004. Проектирование тепловой защиты зданий. — Введ. 2004-09-01. — (Свод правил по проектированию и строительству).
3. Рекомендации по оценке технического состояния жилищно-гражданских объектов. — Луганск : Луганская обласная типография, 2004. — 21 с.
4. Быкова, Н. Д. Термореновация зданий с целью уменьшения уровня теплопотерь / Н. Д. Быкова // Молодой ученый. — 2023. — № 21 (468). — С. 81–83. — Текст : электронный. — URL: <https://moluch.ru/archive/468/103042> (дата обращения: 15.01.2026).
5. Ермаков, Н. О. Обеспечение энергоэффективности при реконструкции жилых домов первых массовых серий / Н. О. Ермаков, М. В. Новиков // Молодой ученый. — 2018. — № 21 (207). — С. 40–44. — Текст : электронный. — URL: <https://moluch.ru/archive/207/50639> (дата обращения: 20.12.2025).

УДК 697

Таран Вера Михайловна,
студентка института гражданской защиты гр. ГЗ-227;
Макаровская Лариса Васильевна,
ассистент каф. пожарной безопасности;
Гусенцова Яна Алимовна,
д.т.н., проф. каф. пожарной безопасности,
ФБГОУ ВО ЛГУ им. В. Даля

ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТЬ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ

Приведено определение воздухопроницаемости ограждающих конструкций зданий. Подчеркнуто, что воздухопроницаемость ограждающих конструкций влияет на функционирование систем микроклимата в помещениях промышленных зданий, играет важную роль в системе пожарной безопасности. Разработана математическая модель расчета разности давлений между двумя противоположными поверхностями ограждающей конструкции здания и расход воздуха, проходящего через нее.

Ключевые слова: воздухопроницаемость, промышленное помещение, вентиляция, пожарная безопасность, модель расчета.

The article provides a definition of the air permeability of building envelopes. It emphasizes that the air permeability of building envelopes affects the functioning of microclimate systems in industrial buildings and plays an important role in fire safety systems. The article develops a mathematical model for calculating the pressure difference between two opposite surfaces of a building envelope and the air flow through it.

Keywords: air permeability, industrial building, ventilation, fire safety, calculation model.

Введение. Воздухопроницаемость – это свойство материала или ограждающей конструкции пропускать воздух. Оно проявляется при наличии разности давлений между внутренним и наружным объемами воздуха, разделяемыми ограждающей конструкцией. Воздухопроницаемость ограждающих конструкций промышленных зданий является важным параметром, который влияет на эффективность теплоизоляции, вентиляции и общей энергоэффективности здания [1, 4]. Этот параметр измеряется в количестве воздуха, проникающего через ограждающую конструкцию при определенном давлении [2, 5].

Промышленные здания, такие как заводы, склады и прочие производственные помещения, обычно имеют специфические требования к воздухопроницаемости. Неконтролируемая утечка воздуха может привести к потере тепла, повышению энергозатрат и ухудшению параметров микроклимата внутри здания [3, 6].

Воздухопроницаемость играет важную роль в вентиляционных процессах промышленных помещений и может влиять на несколько аспектов вентиляции в них. Высокая воздухопроницаемость может снижать эффективность вентиляционной системы, так как часть воздуха будет проникать или выходить через стены, окна или другие ограждающие конструкции. Низкая воздухопроницаемость помогает поддерживать более стабильные условия в помещении, обеспечивая лучший контроль над воздушными потоками.

В целом, при проектировании вентиляционных систем в промышленных помещениях необходимо учитывать воздухопроницаемость материалов ограждений, чтобы обеспечить оптимальные условия работы и эффективность системы вентиляции.

Воздухопроницаемость ограждений играет важную роль в системе пожарной безопасности зданий. Этот параметр влияет на распространение дыма, газов и огня в случае

пожара. Воздухопроницаемость ограждений может влиять на то, насколько эффективно дым и газы, образующиеся в результате пожара, могут распространяться внутри и вокруг здания [1, 2].

Если ограждение слишком воздухопроницаемо, это может способствовать быстрому распространению дыма и токсичных газов, что ухудшит условия эвакуации и усложнит работу спасателям.

Воздухопроницаемость может также влиять на структурную целостность ограждений в условиях высоких температур и пламени [1, 3]. Если материалы ограждений слишком легкие или воздухопроницаемые, то это может привести к их быстрому разрушению, угрожая безопасности здания и людям, находящимся в нем.

Регулирование воздухопроницаемости ограждений является важной составляющей общей стратегии пожарной безопасности, и требует сбалансированного подхода, чтобы обеспечить эффективную защиту зданий и находящихся в нем людей в случае пожара.

Результаты исследований и их анализ. При наличии воздухопроницаемых ограждений наружный воздух поступает в помещение через нижние части здания (инфильтрация), а внутренний выходит через верхние (эксфильтрация).

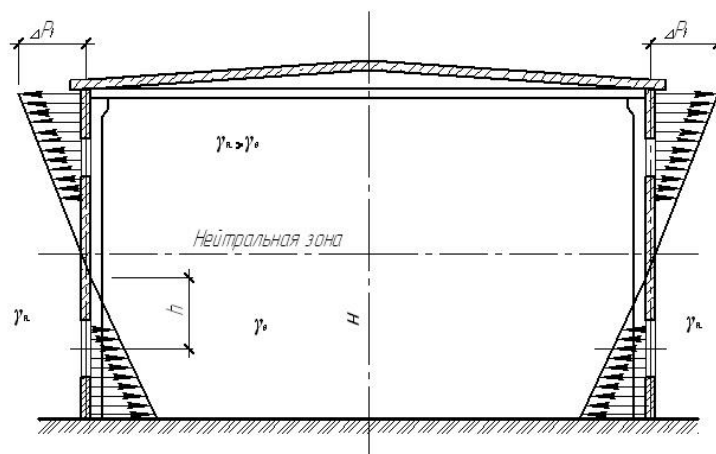


Рисунок 1 - Схема расположения нейтральной зоны

Следовательно, по высоте здание можно разделить на три зоны: нижнюю (зона притока), верхнюю (зона вытяжки) и нейтральную. Первые две характеризуются определенной величиной избыточного давления с противоположными знаками. В нейтральной зоне давление равно атмосферному. Ее положение зависит от соотношения между притоком и вытяжкой (рис.1). Если приток равен вытяжке, нейтральная зона размещается посередине здания. В этом случае максимальная величина теплового напора в верхней и нижней зонах составляет

$$\Delta p_t = 0,5Hg(c_n - c_v), \quad (1)$$

где H – высота здания, м.

На уровне, удаленном от нейтральной зоны на величину h (рис.1), тепловой напор

$$\Delta p_t = 0,5hg(c_n - c_v), \quad (2)$$

В зимний период в целях защиты здания от охлаждения приток холодного воздуха ограничивают, уменьшая площади приточных отверстий. При этом положение нейтральной зоны смещается к зоне вытяжки, и максимальная величина теплового напора определяется по формуле

$$\Delta p_t = 0,55 Hg (c_n - c_e), \quad (3)$$

Ветровой напор обусловлен тем, что поверхности ограждающих конструкций под действием ветра испытывают давление. Полное давление ветра, p_e , Па, на плоскость, перпендикулярную его направлению, имеет выражение

$$p_e = \frac{c v^2}{2}, \quad (4)$$

где v – скорость ветра, м/с; ρ – плотность воздуха, кг/м³.

В действительности давление ветра на поверхность ограждения составляет только часть полного давления, так как не вся кинетическая энергия воздушного потока превращается в потенциальную энергию давления на поверхность. Отношение величины потенциальной энергии давления на поверхность к кинетической энергии воздушного потока носит название аэродинамического коэффициента. Величина его зависит от положения плоскости ограждения по отношению к направлению движения воздушного потока. Для вертикальных ограждений при направлении ветра перпендикулярно к их поверхности аэродинамический коэффициент можно принять равным 0,8 (наветренная сторона) или 0,4 (заветренная). Таким образом, действительное давление ветра на поверхность ограждения

$$p_e = 0,6 \frac{c v^2}{2}, \quad (5)$$

При расчете воздухопроницаемости ограждений с учетом действия теплового и ветрового напоров принимается сумма соответствующих давлений.

Величину Δp для нижнего этажа зданий и сооружений с естественной вытяжной вентиляцией следует определять по формуле

$$\Delta p = 0,55 Hg (c_n - c_e) + 0,03 v^2 \beta^2, \quad (6)$$

где β – коэффициент, учитывающий несовпадение во времени, принятых в расчете скорости ветра и температуры наружного воздуха; v – скорость ветра, м/с.

Точное определение разности давлений воздуха для ограждающих конструкций в многоэтажных зданиях представляет сложную задачу, при решении которой учитывается баланс воздушных масс отдельных помещений.

Причиной воздухопроницаемости строительных материалов является наличие сообщающихся между собой пор. Увлажненные материалы, содержащие в порах капиллярную влагу, имеют, как правило, меньшую воздухопроницаемость [5].

При наличии разности давлений Δp между двумя противоположными поверхностями образца материала через его толщу проходит определенное количество воздуха

$$G = \frac{i}{\delta} \Delta p, \quad (7)$$

где i – коэффициент воздухопроницаемости (количество воздуха, кг, которое за 1 ч проходит через 1 м² слоя однородного материала толщиной 1 м при разности давлений 1 мм. вод. ст.).

Воздухопроницаемость отдельных слоев при инфильтрации оценивается по величине сопротивления воздухопроницанию R_u , которое для сплошных однородных слоев вычисляется по формуле [2, 5]

$$R_u = \frac{\delta}{i}. \quad (8)$$

Сопротивление воздухопроницанию – это разность давлений, при которой за 1 ч через 1 м² данного слоя материала проходит 1 кг воздуха.

Установленные законы распределения давлений внутри и снаружи помещения позволяют найти положение горизонтальной плоскости, на которой наружное давление равно давлению внутри помещения. Эту плоскость называют плоскостью равных давлений (ПРД). Положение этой плоскости определяется координатой, которую обозначают символом y^* ,

Чтобы найти значение координаты плоскости равных давлений, воспользуемся уравнениями (1 – 3).

Положив в этих уравнениях значение координаты равным y^*

$$p_a + g\rho_a(h - y_*) = p_m g\rho_m(h - y_*), \quad (9)$$

где p_a, ρ_a, p_m, ρ_m – давление и плотность наружного и внутреннего воздуха соответственно.

После несложных преобразований из уравнения (9) получается следующая формула для определения координаты ПРД

$$y_* = h - \frac{p_m - p_a}{g(\rho_a - \rho_m)}, \quad (10)$$

Из формулы (10) следует, что положение ПРД зависит от параметров состояния газовой среды в помещении. В процессе развития пожара параметры состояния среды внутри помещения изменяются. Следовательно, в процессе развития пожара изменяется положение ПРД, т.е. изменяется значение координаты y^* . Определение положения ПРД важно для прогнозирования течения пожара в помещениях.

Количество воздуха, проходящее через слой однородного материала, выражается формулой

$$G = \frac{\Delta p}{R_u}. \quad (11)$$

Ограждающие конструкции состоят обычно из нескольких слоев материалов, которые могут иметь различные величины сопротивления воздухопроницанию. В этом случае количество воздуха, проходящее через толщу многослойного ограждения

$$G = \frac{\Delta p}{R_{u1} + R_{u2} + \dots + R_{un}} \quad (12)$$

или

$$G = \frac{\Delta p}{\sum R_{un}}, \quad (13)$$

где $\sum R_{un}$ – сумма сопротивлений воздухопроницанию всех слоев ограждения.

Следствием воздухопроницаемости конструкций является изменение распределения температур в толще ограждения. В однородной однослойной конструкции при отсутствии воздухопроницаемости и наличии разности температур между внутренней и наружной поверхностями распределение температур можно представить в виде прямой линии, нисходящей от внутренней поверхности к наружной (рис. 1). Инфильтрация искривляет такую

линию в сторону понижения величины температур в любом сечении толщи ограждения, а эксфильтрация – в сторону повышения.

Температуру в любом сечении ограждения τ_x при воздухопроницаемости можно найти по формуле

$$\tau_x = t_u + (t_e - t_u) \frac{\exp(cGR_x) - 1}{\exp(cR_0G) - 1}, \quad (14)$$

где t_e, t_u – температура внутреннего и наружного воздуха;

c – удельная теплоемкость воздуха;

R_x – термическое сопротивление ограждения от наружной поверхности до рассматриваемого сечения;

R_0 – термическое сопротивление всего ограждения при отсутствии воздухопроницаемости.

Если в период установившейся инфильтрации линия распределения температур в толще ограждения смещается в сторону понижения, то величина сопротивления теплопередаче уменьшается и определяется выражением

$$R_n = \frac{\exp(cGR_0) - 1}{c \exp(cR_0G)}. \quad (15)$$

При эксфильтрации величина cG в приведенных формулах принимается со знаком «минус».

Сопротивление воздухопроницанию наружных ограждений должно быть не менее требуемого R_u^{mp} , которое определяется по формуле

$$R_u^{mp} = \xi \Delta p, \quad (16)$$

где ξ – коэффициент, который для наружных стен отапливаемых производственных зданий равен 1, чердачных перекрытий – 1,5, для прочих ограждений – 2;

Δp – разность давлений воздуха у наружной и внутренней поверхностей ограждений.

Сопротивление воздухопроницанию не нормируется при проектировании наружных стен с $R_u \geq 20$, покрытий с кровлей из рулонных воздухопроницаемых материалов, а также когда поток воздуха через ограждающие конструкции $G < 0,5$ кг/(м² ч).

Величина R_u наружных слоев ограждения, отделяющих в наружных стенах воздушную замкнутую прослойку, должна быть не менее 0,4 (мм. вод. ст. м² ч) /кг.

Расчет воздухопроницаемости ограждающих конструкций промышленных зданий проводится согласно стандартам и нормативам строительной индустрии. В этом документе приведены основные требования к методам измерения воздухопроницаемости и расчета коэффициентов утечки воздуха [2, 3].

Для конкретного примера расчета воздухопроницаемости промышленного здания необходимо учитывать ряд параметров, таких как площадь ограждающих конструкций, тип используемых материалов, степень уплотнения соединений, наличие и вид системы приточно-вытяжной вентиляции, количество вентиляционных отверстий и другие факторы [1].

Ниже представлен обобщенный пример расчета воздухопроницаемости ограждающей конструкции с использованием формулы, учитывая общие параметры. Однако следует отметить, что для более точных результатов необходимо применять конкретные данные и нормативы вашего региона:

1. Определите площадь ограждающей конструкции (S).

2. Определите разность давления между внутренней и внешней стороной конструкции (ΔP).
3. Используя формулу (7) определить объем воздуха, проходящего через конструкцию Q , м³/час

$$Q = C S \sqrt{\Delta p}, \quad (17)$$

где C – коэффициент воздухопроницаемости (м³/(час·м²·Па)), S – площадь ограждающей конструкции, м², ΔP – разность давления между внутренней и внешней стороной конструкции, Па.

4. Полученное значение Q можно использовать для определения коэффициента воздухопроницаемости C , разделив Q на произведение S и $\sqrt{\Delta p}$

Этот пример является обобщенным и может потребовать корректировок в зависимости от конкретных условий и требований нормативов. Рекомендуется обращаться к местным строительным требованиям и стандартам для точного расчета воздухопроницаемости ограждающих конструкций.

Для расчета инфильтрации воздуха через ограждающие конструкции используются различные программы и инструменты. Вот несколько программ, которые могут быть полезными для проведения подобных расчетов: CONTAM, DesignBuilder (предоставляет возможность моделирования воздушной инфильтрации и проведения анализа энергопотребления зданий. Интегрируется с EnergyPlus для более детального анализа энергетической эффективности). EnergyPlus, является программой для энергетического моделирования зданий, но также может использоваться для анализа воздушных потоков и инфильтрации воздуха. EnergyPlus интегрирован с программой OpenStudio, предоставляя более простой пользовательский интерфейс.

Заключение.

Проведенные исследования касаются широкого класса систем вентиляции промышленных помещений. В частности, рассмотренные вопросы воздухопроницаемости ограждающих конструкций промышленных зданий и их влияние на вентиляцию помещения и его пожарную безопасность могут быть полезны специалистам в рассматриваемой области.

Отмечено, что неконтролируемая утечка воздуха приводит к потере тепла, повышению затрат энергии и ухудшению условий внутри здания.

Подчеркнуто, что воздухопроницаемость влияет на несколько аспектов вентиляции в помещениях промышленных зданий. Высокая воздухопроницаемость может снижать эффективность вентиляционной системы, так как часть воздуха будет проникать или выходить через стены, окна или другие ограждения.

Показано, что воздухопроницаемость ограждений играет важную роль в системе пожарной безопасности зданий. Этот параметр влияет на распространение дыма, газов и огня в случае пожара внутри и вокруг здания, а также на пожарную безопасность помещений.

С учетом этого, авторами разработана математическая модель расчета разности давлений между двумя противоположными поверхностями ограждающей конструкции через его толщину и расход воздуха, проходящего в результате воздухопроницаемости ограждающих конструкций промышленного помещения.

Подчеркнуто, что для конкретного расчета воздухопроницаемости промышленного здания необходимо учитывать ряд параметров, таких как площадь ограждающих конструкций, тип используемых материалов, степень уплотнения соединений, наличие и количество вентиляционных отверстий, и другие факторы.

Приведен обобщенный пример расчета воздухопроницаемости. Указан перечень компьютерных программ для расчета воздухопроницаемости

Список литературы

1. Артемов М.Д. К вопросу воздухопроницаемости ограждающих конструкций / М.Д. Артемов. Тепловой режим. Теплоизоляция и долговечность зданий: сб. науч. тр. Москва : НИИСФ, 1981. С. 51– 55.
2. Богословский В. Н. Тепловой режим здания / В. Н. Богословский. М.: Стройиздат, 1979. – 248 с.
3. ГОСТ 31167–2009 «Методы определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций в натурных условиях». <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/71f/4293812146.pdf>.
4. Протасевич А.М. Строительная теплофизика ограждающих конструкций и микроклимат помещений / А.М. Протасевич. – Минск : БНТУ. 2016. 452 с. ISBN 978-985-550-935-7.
5. Термодинамика для инженеров строителей: Учебник. / Гусенцова Я.А. и [др.]. Луганск. Изд. ЛНУ им. В. Даля. 2020. – 351 с.
6. Air Leakage Characteristics, Test Methods and Specifications for Large Buildings. CMHC Technical Series 1-800-668-2642.

УДК 532.542

Толстенко Владислав Витальевич,
студент гр. ГЗ-217;
Щербак Виктор Николаевич,
ст. преп. каф. пожарная безопасности;
Красногрудов Александр Васильевич,
к.т.н., доц., зав. каф. пожарной безопасности,
ФБГОУ ВО ЛГУ им. В. Даля

СПОСОБ РАСЧЕТА СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛООБМЕНА

В статье рассматривается процесс сопряженного теплообмена, при котором тепло передается несколькими способами или компонентами системы, взаимодействующими друг с другом. Отмечены некоторые наиболее распространенные виды сопряженного теплообмена, сферы их возникновения.

Для расчета сопряженного теплообмена используются ряд подходов - комплексные модели, критерии подобия, экспериментальные исследования. Эти подходы позволяют более точно моделировать и оптимизировать системы теплообмена, учитывая все взаимосвязанные процессы.

Подробно рассмотрен один из случаев сопряженного теплообмена - взаимодействие процессов конвекции и излучения. Подобный подход может быть использован и для других видов.

Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации работы теплогенерирующих установок и других систем, где важен эффективный теплообмен.

Ключевые слова: Сопряженный теплообмен, тепловое излучение, пламя, методы расчета, критерий.

The paper discusses the process of conjugate heat transfer, in which heat is transferred several ways or components of a system interacting with each other. Some of the most common types of conjugate heat transfer, their spheres of occurrence are noted.

A number of approaches are used to calculate conjugate heat transfer - complex models, similarity criteria, and experimental studies. These approaches allow to more accurately model and optimise heat transfer systems, taking into account all interrelated processes.

One of the cases of coupled heat transfer - the interaction of convection and radiation processes - is considered in detail. A similar approach can be used for other types.

The results obtained can be used to optimise the operation of heat generating plants and other systems where efficient heat exchange is important.

Keywords: Conjugate heat transfer, thermal radiation, flame, calculation methods, criterion.

Введение. Сопряженный теплообмен – это процесс, при котором передача тепла происходит одновременно несколькими способами, такими как теплопроводность, конвекция и излучение. Этот вид теплообмена учитывает взаимодействие между различными механизмами передачи тепла и их влияние друг на друга [1, 5].

Отметим некоторые виды сопряженного теплообмена.

- Совместная передача теплоты теплопроводностью и конвекцией – *конвективный теплообмен.*

- Совместная передача теплоты излучением и теплопроводностью – *радиационно-кондуктивный теплообмен.*

- Совместная передача теплоты излучением, конвекцией и теплопроводностью – *радиационно-конвективный теплообмен.*

Также существует сопряженный *регенеративно-рекуперативный теплообмен*, который предполагает объединение рекуперативного и регенеративного теплообменов между газовыми потоками в единой установке.

Учет сопряженного теплообмена важен по нескольким причинам. Это, в первую очередь, точность расчетов. Сопряженный теплообмен позволяет более точно моделировать процессы передачи тепла, учитывая взаимодействие между теплопроводностью, конвекцией и излучением. Это особенно важно в сложных системах, где различные механизмы теплообмена влияют друг на друга [1 – 3].

В системах, таких как камеры сгорания газотурбинных установок или топочные камеры котлов, учет сопряженного теплообмена помогает оптимизировать конструкцию и повысить эффективность охлаждения и теплопередачи.

Не маловажную роль играет энергосбережение. В системах вентиляции и кондиционирования учет сопряженного теплообмена позволяет снизить энергозатраты за счет более эффективного использования тепловых потоков и рекуперации тепла.

Перечисленное подчеркивают важность комплексного подхода к расчетам и проектированию тепловых систем.

Сопряженный теплообмен в системах обеспечения жизнедеятельности играет важную роль в поддержании комфортных и безопасных условий. Вот несколько примеров:

В системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха: теплообмен происходит между воздухом и теплоносителем (например, водой или хладагентом). Это позволяет эффективно управлять температурой и влажностью в помещениях.

Тепловые насосы: используют сопряженный теплообмен для передачи тепла из одного источника (например, из воздуха или грунта) в другой (например, в систему отопления). Это позволяет значительно снизить энергозатраты на отопление и охлаждение.

Эти примеры показывают, как важен учет взаимовлияния различных процессов теплообмена для эффективного функционирования систем обеспечения жизнедеятельности

Для расчета процесса сопряженного теплообмена используют [1, 4, 6]:

1. *Комплексные модели.* Для точного описания теплообмена часто используются комплексные модели, которые учитывают теплопроводность, конвекцию и излучение одновременно. Это позволяет более точно предсказать распределение температур и тепловые потоки в системе.

2. *Критерии подобия:* В теории теплообмена используются безразмерные критерии, такие как число Нуссельта, число Рейнольдса и число Прандтля, которые помогают описать и сравнить процессы теплообмена в различных условиях.

3. *Численные методы:* Для решения уравнений теплообмена и учета взаимовлияния различных процессов часто применяются численные методы, такие как метод конечных элементов или метод конечных разностей.

4. *Экспериментальные исследования:* Лабораторные эксперименты и натурные испытания помогают уточнить модели и проверить их адекватность реальным условиям.

Эти подходы позволяют более точно моделировать и оптимизировать системы теплообмена, учитывая все взаимосвязанные процессы.

Изложение основного материала. Рассмотрим один из случаев сопряженного теплообмена – взаимодействие процессов конвекции и излучения [1]. Исходными данными для определения влияния теплового излучения на коэффициент конвекции, и тем самым на интенсивности процесса теплопередачи являются:

- температура пламени;
- температура окружающего газа;
- состав продуктов сгорания.

Воспользуемся критериальным подходом, упомянутым выше. Далее расчет основан на изменении критерия Грасгофа в зависимости от входящих в него параметров, которые в свою очередь зависят от температуры среды [1, 3].

$$\varepsilon = \begin{cases} 1 & \text{при } Gr \cdot Pr < 10^3, \\ 0,105 (Gr \cdot Pr)^{0,3} & \text{при } 10^3 < Gr \cdot Pr < 10^6, \\ 0,40 (Gr \cdot Pr)^{0,2} & \text{при } 10^6 < Gr \cdot Pr < 10^{10}. \end{cases} \quad (1)$$

$$Gr = \beta \frac{gl^3}{\nu^2} \Delta t. \quad (2)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\chi}. \quad (3)$$

Для газов величина Pr зависит только от количества атомов в молекуле и не зависит от давления и температуры. Для одноатомных газов он равен 0,67, для двухатомных – 0,72, трехатомных – 0,8, четырехатомных и больше – 1. В продуктах сгорания преобладают трехатомные газы, поэтому примем $Pr = 0,8$.

$$Gr \cdot Pr = 0,8 \beta(t) \frac{gl^3 \rho^2}{\eta^2(t)} \Delta t. \quad (4)$$

Входящие величины

$$\beta(t) = \frac{1}{273+t}. \quad (5)$$

Вязкость газа зависит так его от температуры. Теоретическая зависимость, полученная из кинетической теории газа выражена формулой Саттерлэнда [2, 3]

$$\mu = \frac{const T^{3/2}}{T+C}, \quad (6)$$

где константы зависят от рода газа.

На практике пользуются различными эмпирическими формулами

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^n, \quad (7)$$

где показатель степени различен для различных газов и, кроме того, сам зависит от температуры.

С возрастанием температуры он убывает, для приближенных оценок принимают его равным 1 для сравнительно малых и 0,5 для больших температур растет.

Таким образом, система приведенных уравнений позволяет определить коэффициент конвекции и влияние на его величину температуры газа.

Количество энергии, переданной газу за счет излучения определяется как разность между поглощенной и излученной энергиями

$$q = E^{(+)} - E^{(-)}. \quad (8)$$

Эта разность идет на нагрев газа за счет излучения

$$q = cm\Delta t, \quad (9)$$

где c – теплоемкость продуктов сгорания, m – масса газа.

Теплоемкость газовой смеси вычисляется по составу газовой смеси и теплоемкостям отдельных газов, входящих в данную газовую смесь. Газовая смесь может быть задана массовым, объемным и молярным составом.

Если смесь газов задана массовым составом, тогда масса смеси

$$m = \sum_{i=1}^n m_i, \quad (10)$$

где m_i – масса i -го компонента, входящего в смесь.

Очевидно, для увеличения температуры газовой смеси на Δt необходимо увеличить температуру на Δt каждого газа этой смеси. При этом на нагревание каждого газа смеси необходимо затратить количество теплоты

$$q_i = m_i c_i \Delta t, \quad (11)$$

где c_i – массовая теплоемкость i -го газа смеси.

Теплоемкость газовой смеси определяется из уравнения теплового баланса [2]

$$mc\Delta t = \sum m_i c_i \Delta t, \quad (12)$$

где c – теплоемкость газовой смеси.

Разделив левую и правую части уравнения на $m\Delta t$, получим

$$c = \sum_{i=1}^n g_i c_i, \quad (13)$$

где g_i – массовая доля i -го газа, входящего в смесь.

Из последнего выражения видно, что теплоемкость смеси газов, заданной массовыми долями (массовая теплоемкость смеси), равна сумме произведений массовых долей на массовую теплоемкость каждого газа.

С помощью аналогичных рассуждений можно найти сходные по структуре с полученным выражением выражения для объемной и мольной теплоемкостей газовой смеси.

Выводы.

Подводя итог, отметим следующее.

- Рассмотрены основные виды сопряженного теплообмена.
- Показана необходимость учета сопряженного теплообмена в ряде технических устройств.
- Рассмотрены методы расчета сопряженного теплообмена.
- Приведен пример критериального подхода для расчета сопряженного теплообмена.

Список литературы

1. Коваленко А.А. Взаимовлияние процессов тепломассопереноса в котельных установках/ А.А. Коваленко, Я.А. Гусенцова, Н.Д. Андрийчук, М.В. Пилавов. – Луганск: Изд-во ЛНУ им. В. Даля, 2017. – 196 с.
2. Коваленко А.А. Термодинамика для инженеров-строителей/ А.А. Коваленко, Н.Д. Андрийчук, Я.А. Гусенцова, М.В. Пилавов. – Луганск: Изд-во ЛНУ им. В. Даля, 2020. – 351 с.
3. Недопекин Ф.В. Теоретические и прикладные аспекты теплопереноса / Недопекин Ф.В., Гинкул С.И. Новикова Е.В. – Донецк: ДонНУ, 2013. – 321 с.
4. Пригожин И. Современная термодинамика от тепловых двигателей до диссипативных структур/ Пригожин И., Кондепуди Д. – М.: Мир, 2002. – 461 с.
5. Forland K. S. Irreversible Thermodynamics: Theory and Applications.–N.Y.: John Wiley, 1988.
6. Haase R. Thermodynamics of Irreversible Processes. – N.Y.: Dover, 1990. (Русский перевод: Хаазе Р. Термодинамика необратимых процессов.– М.: Мир, 1967.)

УДК 625.088

Монах Светлана Игоревна,
к.т.н., доцент, доцент каф. ТТГВ;
Гогохия Игорь Гиевич,
магистрант гр.ТГВм-54а;
Жукова Елена Андреевна,
магистрант гр.ТГВм-54а,
ДОННАСА-филиал НИУ МГСУ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА БИТУМОПЛАВИЛЬНОГО АГРЕГАТА ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА ГАЗООБРАЗНОМ ТОПЛИВЕ

В данной статье с целью анализа энергетической эффективности битумоплавильного агрегата, работающего на газообразном топливе, выполнено моделирование теплового баланса такого агрегата. Полученный математический аппарат позволяет определять такие важнейшие характеристики процесса разогрева битума различными видами топлива, как: время разогрева, мин.; затраты топлива на весь процесс разогрева G , кг; тепловой поток, полученный при сжигании топлива Q_i , кВт; тепловой эквивалент топлива $\mathcal{E}$; удельный тепловой поток, переданный битуму от 1 кг условного топлива q , кВт/кг; количество теплоты, воспринятое битумом, МДж; тепловой поток, воспринятый битумом Q_2 , кВт; КПД агрегата, %.

Ключевые слова: битумоплавильный агрегат, агрегаты с открытыми топками, газообразное топливо, моделирование теплового баланса, статьи прихода теплоты, статьи расхода теплоты, время разогрева битума, затраты топлива на весь процесс разогрева, тепловой эквивалент топлива, тепловой поток, полученный при сжигании топлива, удельный тепловой поток, переданный битуму, КПД агрегата, %.

В настоящее время в битумоплавильных агрегатах с открытой топкой в качестве источника тепловой энергии используются древесина и древесные отходы, дизельное топливо, газовое топливо и электроэнергия.

На основании проведенного обзора установлено, что использование газообразных видов топлива для передвижных битумоплавильных агрегатов с открытой топкой наиболее оправдано, так как обеспечивает требуемые параметры технологического процесса при минимальных капитальных затратах и низкой экологической нагрузке [1-4].

Использование других видов топлива нерационально из-за их несоответствия по целому ряду требуемых параметров: времени разогрева, равномерному теплообмену, работе без принудительной подачи воздуха, обеспечению требований норм экологической безопасности, отсутствию дополнительных источников энергии.

Применение газообразных видов топлива в передвижных агрегатах с открытым топочным пространством, работающих на наружном воздухе, позволяет решить актуальную задачу двухстадийного разогрева строительных материалов непосредственно на месте базирования и производства работ. В качестве источника тепловой энергии также перспективно использование альтернативных топлив для нагрева строительных материалов, в частности, биогаза.

Использование альтернативных газообразных топлив в передвижных агрегатах ограничено из-за недостаточной проработанности целого комплекса вопросов, оказывающих

значительное влияние как непосредственно на сжигание, так и на весь процесс разогрева строительных материалов [5].

Соблюдение технологии заключается в основном в требовании ко времени разогрева строительных материалов до требуемой температуры и последующее ее поддержание на заданном уровне. Необходимым требованием является соблюдение равномерного режима разогрева, не допускающего локальных перегревов теплообменной поверхности, приводящих к изменению физических свойств материалов.

Исследование параметров работы агрегатов с открытыми топками при сжигании традиционных и альтернативных газообразных топлив возможно на основании расчета их теплового баланса, позволяющего определить энергетическую эффективность агрегата в целом.

Анализ работы передвижных агрегатов при использовании различных видов газообразного топлива (биогаз, СУГ, природный газ) проведен на основе составления теплового баланса физической модели битумоплавильного агрегата, являющегося точной копией типовых эксплуатируемых котлов и передвижного битумоплавильного агрегата периодического действия.

Уравнение теплового баланса для битумоплавильного агрегата периодического действия имеет вид

$$\sum Q_{\text{прих}} = \sum Q_{\text{расх}}, \quad (1)$$

где $\sum Q_{\text{прих}}$ - статьи прихода теплоты от химической теплоты сжигаемого топлива

$Q_{\text{х.т.}}$; $\sum Q_{\text{расх}}$ - статьи расхода теплоты.

Статьи расхода теплоты включают в себя следующие составляющие: $Q_{\text{бит}}$ - на нагрев битумной смеси до расчетной температуры; $Q_{\text{ист}}$ - на нагрев металла стенок; $Q_{\text{ух}}$ - с уходящими газами; $Q_{\text{сттоп}}$ - теплопроводностью через стенки топочного пространства; $Q_{\text{стрп}}$ - теплопроводностью через стенки рабочего пространства; $Q_{\text{неучт}}$ - на неучтенные потери.

Химическая теплота сжигаемого топлива, кДж/ч:

$$Q_{\text{х.т.}} = V_{\text{г}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{p}},$$

где $V_{\text{г}}$ - расход топлива, м³/ч; $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$ - низшая теплота сгорания топлива, МДж/м³.

Определение статей расхода теплоты.

1) Теплота, затраченная на нагрев битумной смеси, кДж/цикл;

$$Q_{\text{бит}} = G \cdot (i_{\text{к}} - i_{\text{н}}), \quad (2)$$

где G – производительность котла кг/цикл;

i – энтальпия материала в начале и конце процесса разогрева, кДж/цикл.

$$i_{\text{н}} = c_{\text{бит}} \cdot t_{\text{бит}}^{\text{н}},$$

$$i_{\text{к}} = c_{\text{бит}} \cdot t_{\text{бит}}^{\text{к}},$$

где $c_{\text{бит}}$ – теплоемкость битума, кДж/кг·°С [7]; $t_{\text{бит}}^{\text{н}}$, $t_{\text{бит}}^{\text{к}}$ - соответственно начальная и конечная температура битума, °С. Для рассматриваемых условий начальная температура битума принята равно температуре наружного воздуха.

При соблюдении технологии ремонта и строительства дорожных одежд, изоляции сварных стыков трубопроводов, гидроизоляции каналов, камер, колодцев производство работ ведется с апреля по октябрь. Принята среднемесячная температура за расчетный период $t_{\text{ср}} = +16,8$ °С.

2) Теплота, затраченная на нагрев металла стенок котла, кДж/цикл:

$$Q_{\text{ист}} = M \cdot (i_k - i_n), \quad (3)$$

где M - масса стенок битумоплавильного агрегата, кг.

$$M = M_{\text{ст}} + M_{\text{п}},$$

где $M_{\text{ст}}$ - масса корпуса агрегата, кг; $M_{\text{п}}$ - масса внутренней горизонтальной перегородки, отделяющей топочное пространство от рабочего, кг.

Удельная теплоемкость стального корпуса котла и перегородки по данным [6] принята равной 0,482 кДж/кг·°С.

3) Потери теплоты с уходящими газами, кДж/ч

$$Q_{\text{yx}} = V_{\text{yx}} \cdot c_{\text{yx}} \cdot t_{\text{yx}}, \quad (4)$$

где V_{yx} - объем продуктов сгорания, образующихся при сжигании 1 м³ топлива, м³/м³; t_{yx} - температура уходящих газов, °С; c_{yx} - теплоёмкость удаляемых продуктов сгорания, кДж/м³

Объем влажных продуктов сгорания [5], м³/м³

$$V_{\text{yx}} = \left(L + \frac{0,075}{4,19} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{p}} \right) \cdot V_{\text{r}}, \quad (5)$$

где L - количество воздуха, теоретического необходимого для горения, м³

4) Потери теплоты теплопроводностью через стенки рабочего пространства.

Определение величины теплового потока, Вт произведено по основному уравнению теплопередачи

$$q = k \cdot (t_{\text{бит}} - t_{\text{с}}) \cdot F \quad (6)$$

где k - коэффициент теплопередачи от теплоносителя через стенку в окружающую среду, Вт/м²·°С;

$t_{\text{бит}}$, $t_{\text{с}}$ - соответственно температура битума и окружающей среды, °С;

F - наружная поверхность стенки, м²,

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (7)$$

где $\sum \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}}$ - термическое сопротивления теплопроводности стенки с толщиной слоя δ , мм, и коэффициентом теплопроводности слоя λ Вт/(м·°С);

$1/\alpha_1$, $1/\alpha_2$ - соответственно термическое сопротивление теплоотдачи от битума к металлической стенке и от стенки к окружающей среде, (м²·°С)/Вт.

За определяющую температуру принята средняя температура битума за период разогрева, за определяющий размер - диаметр агрегата $d_{\text{агр}}$, м [8, 9].

Коэффициент теплоотдачи от битума к стенке, Вт/(м²·°С)

$$\alpha_1 = \frac{\text{Nu}_{1\text{p}} \cdot \lambda_{\text{бит}}}{d_{\text{агр}}} \quad (8)$$

где $\text{Nu}_{1\text{p}}$ - число Нуссельта рабочего пространства для системы битум-стенка; $\lambda_{\text{бит}}$ - коэффициент теплопроводности битума, Вт/(м·°С);

$d_{\text{агр}}$ - диаметр полуцилиндра рабочей части битумоплавильного агрегата, м.

$$Nu_{1p}=3,66 \cdot \left(Re_p \cdot \frac{d_{agr}}{l_{agr}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (9)$$

где Re_p - число Пекле для рабочего пространства агрегата;

l_{agr} - длина рабочего пространства, м.

$$Re_p = \frac{\omega_p \cdot d_{agr}}{a_{бит}}, \quad (10)$$

где ω_p - средняя скорость конвективного перемещения битума в рабочем пространстве агрегата, м/с;

a - коэффициент температуропроводности битума, м²/с [7].

$$a_{бит} = \frac{\lambda_{бит}}{\rho_{бит} \cdot c_{бит}}, \quad (11)$$

Коэффициент теплоотдачи от стенки в окружающую среду, Вт/(м²·°C)

$$\alpha_2 = \frac{Nu_{2p} \cdot \lambda_{воз}}{d_{agr}} \quad (12)$$

где Nu_{2p} – число Нуссельта рабочего пространства для системы стенка-воздух;

$\lambda_{воз}$ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°C);

$$Nu_{2p}=0,5 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,38} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25} \quad (13)$$

где Re – число Рейнольдса;

Pr – число Прандтля;

Pr_c – тоже при температуре равной t_c ,

$$Re = \frac{\omega_{воз} \cdot d_{agr}}{\nu}$$

где ν – кинематическая вязкость, м²/с;

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_{воз}}{\nu}$$

где μ - динамическая вязкость, Па·с;

$c_{воз}$ – теплоёмкость воздуха, кДж/кг·°C

5) Потеря теплоты теплопроводностью через стенки топочного пространства

За определяющую температуру принята средняя температура продуктов сгорания, за определяющий размер – диаметр трубы.

Коэффициент теплоотдачи от дымовых газов стенке, Вт/(м²·°C);

$$\alpha_1 = \frac{Nu_{1T} \cdot \lambda_{yx}}{d_{agr}}$$

где Nu_{1T} – критерий Нуссельта топочного пространства для системы дымовые топочные газы-стенка;

λ_{yx} – коэффициент теплопроводности дымовых топочных газов, Вт/(м·°C);

$$Nu_{1T}=3,66 \cdot \left(Re_T \cdot \frac{d_{арп}}{l} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (14)$$

$$Re_T = \frac{\omega_T \cdot d_{арп}}{a_{yx}}$$

где ω_T – средняя скорость конвективного перемещения отводимых продуктов сгорания в топочном пространстве агрегата, м/с;

a_{yx} – коэффициент температуропроводности топочных газов, м²/с.

$$a_{yx} = \frac{\lambda_{yx}}{\rho_{см} \cdot c_p^{см}}$$

Согласно правилу смешивания удельная теплоемкость $c_p^{см}$, кДж/кг·°C, и плотность $\rho_{см}$, кг/м³, смеси газов определяется по формулам

$$c_p^{см}=V_1 \cdot c_{p1}+V_2 \cdot c_{p2}+...+V_n \cdot c_{pn} \quad (15)$$

где V – объёмное содержание компонента в долях;

c_c – теплоёмкость каждого компонента, входящего в смесь, кДж/кг·°C

$$\rho_{см}=V_1 \cdot \rho_{p1}+V_2 \cdot \rho_{p2}+...+V_n \cdot \rho_{pn} \quad (16)$$

где ρ – плотность газов, входящих в смесь, кг/м³.

Коэффициент теплоотдачи от стенки в окружающую среду, Вт/(м²·°C)

$$\alpha_2 = \frac{Nu_{2T} \cdot \lambda_{воз}}{d_{арп}}$$

где Nu_{2T} – критерий Нуссельта топочного пространства для системы стенка-воздух.

$$Nu_{2T}=0,5 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,38} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_e} \right)^{0,25} \quad (17)$$

Коэффициент динамической вязкости μ , Па·с, для смеси газов определяется по формуле

$$\mu_{см} = \frac{N_{1мол} \cdot \mu_1 \cdot \sqrt{M_1} + ... + N_{пмол} \cdot \mu_n \cdot \sqrt{M_n}}{N_{1мол} \cdot \sqrt{M_1} + ... + N_{пмол} \cdot \sqrt{M_n}} \quad (18)$$

где μ – динамическая вязкость компонента, Па·с,

$N_{мол}$ – молярная концентрация компонентов смеси;

M – молярная масса каждого компонента, кг/кмоль;

6) Суммарный расход теплоты вследствие химической неполноты сгорания и неучтённые потери равным 15% от суммы всех статей расхода.

Расчетные исследования произведены на один цикл разогрева битума на модели битумоплавильного агрегата и действующем прототипе. Средняя продолжительность одного

цикла принята равной 150 мин (2,5 ч). Температура разогрева битума – 150 °С. Плотность битумной смеси $\rho_{\text{бит}}=1400 \text{ кг/м}^3$ [8, 10, 11, 12].

После определения всех статей прихода и расхода теплоты составлен тепловой баланс битумоплавильного агрегата при работе на различных видах газообразного и твердого топлива. Результаты расчета сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Уравнения теплового баланса

Вид топлива	Уравнение по статьям		Расход топлива	
	прихода газа	расхода тепла	м ³ /ч	м ³ /цикл
Модель битумоплавильного агрегата				
Прир. газ	$33900 \cdot V_{\text{Г}}$	$36883+4510 \cdot V_{\text{Г}}$	1,25	3,14
СУГ	$94000 \cdot V_{\text{Г}}$	$36859+8114 \cdot V_{\text{Г}}$	0,46	1,07
Биогаз	$17900 \cdot V_{\text{Г}}$	$36896+2705 \cdot V_{\text{Г}}$	2,43	6,07
Дрова	$5000 \cdot V_{\text{Г}}$	$46492+1059766 \cdot V_{\text{Г}}$	0,0118(7,6)*	0,0295(19,2)
Передвижной битумоплавильный агрегат периодического действия				
Прир. газ	$33900 \cdot V_{\text{Г}}$	$66273+4510 \cdot V_{\text{Г}}$	2,25	5,64
СУГ	$94000 \cdot V_{\text{Г}}$	$66248+8114 \cdot V_{\text{Г}}$	0,77	1,93
Биогаз	$17900 \cdot V_{\text{Г}}$	$66286+2705 \cdot V_{\text{Г}}$	4,36	10,91
Дрова	$5000 \cdot V_{\text{Г}}$	$83549+1059766 \cdot V_{\text{Г}}$	0,0212(13,8)*	0,053(34,5)*
*Примечание. В скобках приведен расход топлива, кг				

По результатам расчета теплового баланса могут быть определены значения наиболее характерных параметров процесса разогрева и технологический КПД битумоплавильного агрегата при работе на различных видах газообразного топлива. Важнейшими характеристиками процесса разогрева битума различными видами топлива являются: время разогрева, мин.; затраты топлива на весь процесс разогрева G , кг; тепловой поток, полученный при сжигании топлива Q_1 , кВт; тепловой эквивалент топлива $\mathcal{E}$; затраты топлива на весь процесс разогрева G_y , кг у.т.; удельный тепловой поток, переданный битуму от 1 кг условного топлива q , кВт/кг; количество теплоты, воспринятое битумом, МДж; тепловой поток, воспринятый битумом Q_2 , кВт; удельный тепловой поток, воспринятый битумом от 1 кг условного топлива q_2 , кВт/кг; КПД агрегата, %.

Список литературы

1. Битумное хозяйство [Электронный ресурс] : Оборудование для битумных баз. - Режим доступа: <http://www.nombus.ru/product/bitumen.php>, свободный. Битумоварка с теплоизоляцией БВ-1,2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.tgn93.ru/krov/bv_1.2.htm, свободный.
2. Мариненко Е.Е. Экологические характеристики сжигания биогаза и природного газа / Е.Е. Мариненко, Г.П. Комина - М.: ВПИИЭгазпром, 1992.
3. Марышев Б. Оборудование для строительства современных дорог [Электронный ресурс]: Дорожная техника / Б. Марышев, Б. Соловьев. – Режим доступа: <http://archive.expert.ru/oborud/00/04-00/4ogl.htm>, свободный.
4. Приборы и оборудование. Битумоварка [Электронный ресурс]: каталог Саратовского научн.-произв. центра «РОСДОРТЕХ». - Режим доступа: <http://www.rdt.ni/equipment>, свободный.

5. Иссерлин А.С. Основы сжигания газового топлива [Текст]: Справочное пособие / А.С. Иссерлин. - 2-е изд., перераб. и доп. - Д.: Недра, 1987.
6. Перегудов В.В. Тепловые процессы и установки технологии полимерных строительных материалов и изделий [Текст]: учебник для вузов / В.В. Перегудов. - М.: «Высшая школа», 1973.
7. Иноземцев А.А. Битумно-минеральные материалы [Текст] / А.А. Иноземцев. - Д.: Стройиздат, Ленингр. отд., 1972.
8. Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов теплообмена [Текст] / А.А. Гухман. - М., «Высшая школа», 1967.
9. Краснощеков П.С. Принципы построения моделей [Текст] / П.С. Краснощеков, А. А. Петров. - М.: Изд-во МГУ, 1983.
10. Черкасов А.В. Методика определения оптимальных параметров работы битумоварочного агрегата на модели [Текст] / А.В. Черкасов // IX Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области. Направление №16 «Экология, охрана среды, строительство». - Волгоград, 2004.
11. Черкасов А.В. Обеспечение тепловых режимов автономной работы передвижных битумоплавильных агрегатов [Текст] / А.В. Черкасов // X Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области. Направление №16 «Архитектура, градостроительство, строительство и экологические проблемы» - Волгоград, 2005.
12. Черкасов А.В. Утилизация биогаза в битумоварочных агрегатах малой производительности [Текст] / А.В. Черкасов // VIII Региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области. Направление №16 «Экология, охрана среды, строительство» - Волгоград, 2003.

УДК 69(076)

Монах Светлана Игоревна,
к.т.н., доцент каф. ТТГВ;
Жукова Елена Андреевна,
магистрант гр.ТГВм-54а;
Гогохия Игорь Гиевич,
магистрант гр.ТГВм-54а,
ДОННАСА - филиал НИУ МГСУ

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНОЙ ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ С МНОГОРЯДНОЙ ЗАСТРОЙКОЙ СЕЛИТЕБНОЙ ТЕРРИТОРИИ

В данной статье с целью учета структуры застройки населенного пункта, климатических условий эксплуатации, материала и способа прокладки газопровода, гидравлических режимов эксплуатации, тепловой эффективности использования газового топлива, режимов давления газа перед газоиспользующим оборудованием и неопределенности исходной экономической информации, предложена математическая модель по оптимальной централизации распределительных систем газоснабжения с многорядной застройкой селитебной территории.

Полученный математический аппарат позволит корректировать расчетный перепад давления и получить более полное распределение перепада давления по участкам газовой сети и, как результат, снижение металлоемкости и общей стоимости строительства.

Ключевые слова: система газоснабжения, структура застройки, многорядная застройка селитебной территории, оптимальная централизация распределительных систем, климатические условия, способ прокладки газопровода, гидравлический режим эксплуатации, тепловая эффективность использования газового топлива, газоиспользующее оборудование, расчетный перепад давления, целевая функция, удельные дисконтированные затраты.

Рассмотрим вариант групповой (многорядной) застройки [1].

Для определения удельной протяженности распределительных газовых сетей среднего (высокого) давления воспользуемся расчетной моделью системы газоснабжения, приведенной на (рис. 1) и (рис. 2) [2].

При разработке расчетных схем использовались следующие допущения: - планировка газоснабжаемой территории — квадратная с размерами жилого массива ($A \times A$); - территория застроена зданиями равномерно; - между центрами зданий расстояние в осевом и перпендикулярном направлении одинаково и равно a ; - здания имеют одинаковую этажность и количество квартир n_0 . Удельные дисконтированные затраты в сети среднего давления определяются по формуле

$$\frac{Z_{сд}}{n} = Z'_{сд} \cdot l_{сд}, \quad (1)$$

где $Z'_{сд}$ - дисконтированные затраты в 1пм газопровода среднего давления, руб/(год·пм), принимаются дифференцировано в зависимости от способа прокладки газопровода и его среднего диаметра;

$l_{\text{сд}}$ - удельная (на 1 газифицируемый жилой дом) протяженность газопроводов высокого (среднего) давления, м/кв.

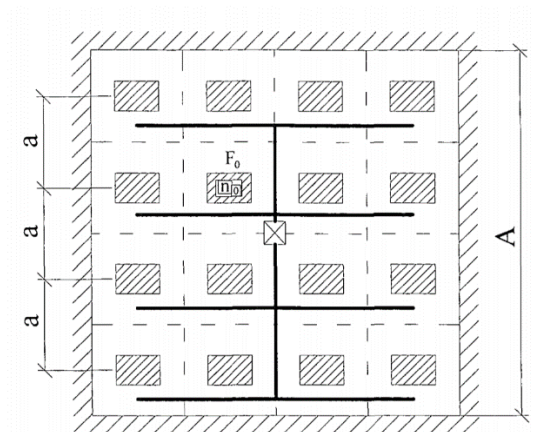


Рис.1 - Модель газопроводов низкого давления:

⊠ - ГРПШ ▨ - жилое здание — - газопровод низкого давления;
a - размер жилого массива, приходящегося на одно здание;
 n_0 - количество квартир в одном здании.

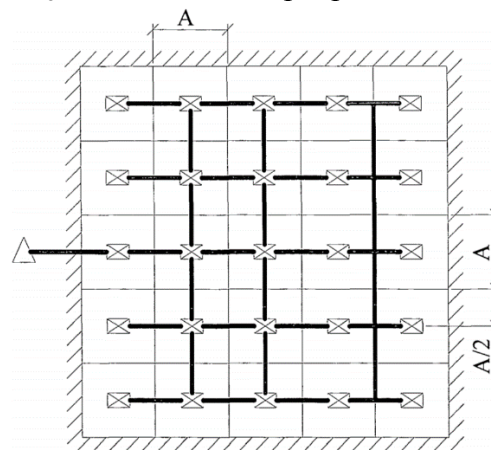


Рисунок 2 - Модель газопроводов среднего давления:

△ - ГГРП ⊠ - ГРПШ

A - размеры жилого массива, снабжаемого газом от одного ГРПШ

— газопроводы среднего давления

Согласно (рисунок 2) удельный (на один ГРПШ) километраж газопроводов среднего (высокого) давления составляет

$$l_{\text{сд}} = (1/2 \div 2) A/n, \quad (2)$$

или в среднем:

$$l_{\text{сд}} = \frac{1,25\Phi}{n} = 1,25 \sqrt{\frac{S}{q \cdot n}}. \quad (3)$$

где S - коэффициент, учитывающий заселенность квартир жилых зданий;

q - число жителей, приходящихся на 1 м² газоснабжаемой территории, чел/м²;

$$A = \sqrt{F} = \sqrt{\frac{S}{q \cdot n}}.$$

Подставляя (3) в (1) получим

$$\frac{z_{cd}}{n} = 1.25 \left[(a_{cd} + d_{cd} \cdot d_{cp}^{cd}) \cdot ((1 + \varphi) + \mu_{cd}) \sum_l^{t_{cl}} \frac{1}{(1+E)^t} \right] \cdot \sqrt{\frac{s}{q \cdot n}} = f(n)_{cd}. \quad (4)$$

Наибольшая доля затрат в двухступенчатые системы газоснабжения приходится на распределительные (уличные) газопроводы низкого давления. Приведенные затраты в газопроводы низкого давления определяют по формуле

$$z_{нд} = z_{гм}(n; \Delta P_{гм}) + z_{отв}(n; \Delta P_{отв}) + z_{вг}(\Delta P_{вг}), \quad (5)$$

где $z_{гм}, z_{отв}, z_{вг}$ - соответственно, приведенные затраты в головную магистраль, в ответвления от нее, в дворовые и внутридомовые газовые сети, руб./((год·кв.);

$\Delta P_{гм}, \Delta P_{отв}, \Delta P_{вг}$ - потери давления на участках системы газоснабжения, Па.

Введем ограничения к целевой функции (5)

$$\Delta P_{гм} + \Delta P_{отв} + \Delta P_{вг} = \Delta P, \quad (6)$$

$$0 < \Delta P \leq \Delta P_{min}^p, \quad (7)$$

где ΔP_{min}^p - располагаемый минимальный перепад давлений в газовой сети, Па, принимаемый по рекомендациям [1].

В общем случае удельные (на один газифицируемый жилой дом) дисконтированные затраты в газопроводы низкого давления определяются по формуле

$$\frac{z_{нд}}{n} = z'_{нд} \cdot l_{нд}, \quad (8)$$

где $z'_{нд}$ - дисконтированные затраты в 1 км газопровода низкого давления, руб./((год·км). Принимаются дифференцировано в зависимости от способа прокладки газопровода и его среднего диаметра;

$l_{нд}$ - удельная протяженность газовых сетей низкого давления в расчете на одну газифицируемую квартиру, м/кв. Тогда, можно записать

$$z'_{нд} = a_{нд} + b_{нд} \cdot d_{ср}^{нд}, \quad (9)$$

где $d_{нд}$ - средний диаметр газопровода низкого давления, см;

$a_{нд}, b_{нд}$ стоимостные параметры газопровода низкого давления, имеющие размерности руб./((год·км) и руб./((год· км·см) соответственно

После преобразований получим

$$\frac{z_{нд}}{n} = (a_{нд} + b_{нд} \cdot d_{ср}^{нд}) \cdot l_{нд}. \quad (10)$$

Согласно (рисунок 1) удельный километраж газовых сетей низкого давления

$$l_{нд} = \frac{l}{n} \cdot (N + \sqrt{N}) = \sqrt{\frac{s}{q \cdot n}} \cdot \left(\sqrt{\frac{n}{n_0}} + 1 \right), \quad (11)$$

где n_0 – количество квартир в одном газифицированном доме;

N – количество домов, снабжаемых газом от одного пункта редуцирования.

Тогда с учетом (11) уравнение (10) примет следующий вид

$$\frac{z_{нд}}{n} = \left[(a_{нд} + b_{нд} \cdot d_{ср}^{нд}) \cdot ((1 + \varphi) + \mu_{нд}) \sum_l^{t_{сд}} \frac{l}{(1+E)^l} \right] \cdot \sqrt{\frac{S}{q \cdot n}} \cdot \left(\sqrt{\frac{n}{n_0}} + l \right) = f(n)_{нд}. \quad (12)$$

Для определения среднего диаметра газопроводов низкого давления $d_{нд}$ воспользуемся расчетной моделью газовой сети (рис. 2) применительно к средней нитке распределительного газопровода.

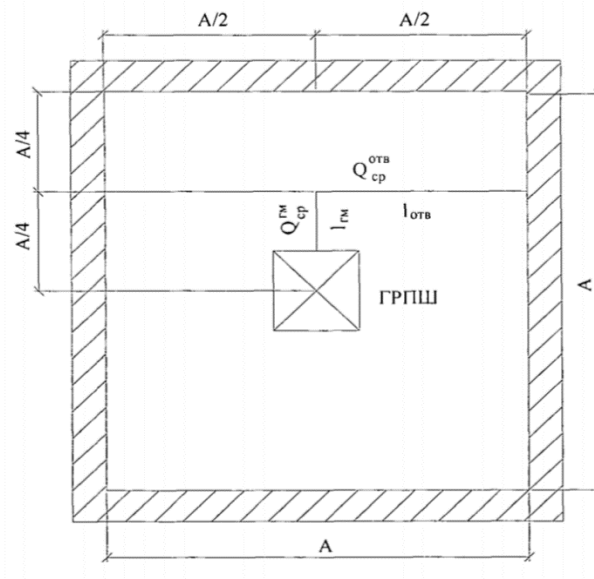


Рисунок 3 - Расчетная модель средней нитки уличного газопровода низкого давления

Средний расход газа на расчетной нитке газопровода можно определить по формуле

$$G_{ср} = \frac{G_{ср}^{ГМ} \cdot l_{ГМ} + G_{ср}^{ОТВ} \cdot l_{ОТВ}}{l_{ср}}, \quad (13)$$

где $G_{ср}^{ГМ}$, $G_{ср}^{ОТВ}$ – усредненный расход газа на головной магистрали и на ответвлении от нее.

Расход газа в начале головной магистрали (на выходе из ГРПШ) определяется по рекомендациям [1] в зависимости от газового оборудования квартир при $m = \frac{n}{2}$. Аналогично расход газа в конце головной магистрали находим при $m = \frac{n}{4}$.

Представим средний расход газа на головной магистрали как полусумму расходов газа в начале и на середине газопровода

$$Q_{ср}^{ГМ} = \frac{Q_{н}^{ГМ} + Q_{к}^{ГМ}}{2}. \quad (14)$$

Расход газа в начале головной магистрали:

$$Q_{н}^{ГМ} = \frac{n}{2} (k_0 \cdot q). \quad (15)$$

Расход газа в конце головной магистрали:

$$Q_{\kappa}^{\Gamma M} = \frac{n}{4} (k_0 \cdot q). \quad (16)$$

Расход газа в начале ответвления определяется при следующем условии

$$m = \frac{\sqrt{N}}{2} \cdot n_0 = 0,5 \sqrt{n \cdot n_0}, \quad (17)$$

где N – количество зданий, снабжаемых газом от одного ГРПШ, зд;

n_0 – количество квартир в одном газифицированном доме, кв/зд.

Средний расход газа на ответвлении

$$Q_{\text{ср}}^{\text{отв}} = a \cdot Q_{\text{н}}^{\text{отв}}, \quad (18)$$

где a – коэффициент путевого расхода.

Численные значения коэффициента путевого расхода a принимаются в зависимости от количества зданий, подключенных к ответвлению распределительного газопровода $D = \frac{\sqrt{N}}{2}$ по таблице 1 [3, 4], при этом предусматривается, что к каждому зданию имеется отдельный отвод от распределительного газопровода.

Таблица 1 – Значения коэффициента a

Количество зданий D	1	2	5	10	100	∞
Коэффициента a	1	0,707	0,606	0,592	0,577	0,577

В результате обработки табличных данных методом математической статистики получена следующая зависимость (с доверительной вероятностью 0,95)

$$\alpha = 0,577 + \frac{0,427}{D^{1,78}}. \quad (19)$$

Положив в уравнение (2.34) $D = \frac{\sqrt{N}}{2} = 0,5 \sqrt{\frac{n}{n_0}}$, получим

$$Q_{\text{ср}}^{\text{отв}} = \left(0,577 + \frac{0,854}{\left(\frac{n}{n_0}\right)^{0,89}} \right) \cdot Q_{\text{н}}^{\text{отв}}. \quad (20)$$

Для определения диаметра газопроводов, работающих в зоне гидравлически гладких труб будем использовать следующую формулу

$$d = a_0^{0,21} \cdot Q^{0,368} \cdot \left(\frac{1}{\Delta P}\right)^{0,21}, \quad (212)$$

где a_0 - коэффициент пропорциональности, принимается в зависимости от состава газа. Для газопроводов природного газа по [3]: $a_0 = 20,8 \frac{\text{Па} \cdot \text{см}^{4,75}}{\text{м} \cdot (\text{м}^3/\text{ч})^{1,75}}$.

Введем следующие обозначения:

ΔP - располагаемый перепад давления в распределительном газопроводе, Па;

$\Delta P_{\Gamma M}$ - потери давления в головной магистрали;

$\Delta P_{\text{отв}} = \Delta P - \Delta P_{\Gamma M}$ - потери давления в ответвлении.

Тогда уравнение (21) примет следующий вид

$$d_{\text{ГМ}} = a_0^{0,21} \cdot (Q_{\text{ср}}^{\text{ГМ}})^{0,768} \cdot \left(\frac{l_{\text{ГМ}}}{\Delta P_{\text{ГМ}}} \right)^{0,21}, \quad (22)$$

$$d_{\text{отв}} = a_0^{0,21} \cdot (Q_{\text{ср}}^{\text{отв}})^{0,368} \cdot \left(\frac{l_{\text{отв}}}{\Delta P - \Delta P_{\text{ГМ}}} \right)^{0,21}, \quad (23)$$

где $l_{\text{ГМ}}, l_{\text{отв}}$ - протяженности головной магистрали и ответвления для средней нитки уличного газопровода, м.

Согласно модели газораспределительной системы (рисунки 1 и 2) запишем

$$l_{\text{ГМ}} = B \frac{\sqrt{N}}{4} = 0,25 \sqrt{\frac{S \cdot n}{q}}. \quad (24)$$

$$l_{\text{отв}} = \frac{B}{2} (\sqrt{N} - 1) = 0,5 \left(\sqrt{\frac{S \cdot n}{q}} - \sqrt{\frac{S \cdot n_0}{q}} \right), \quad (25)$$

где B - размер селитебной территории в расчете на одно газифицируемое здание.

Подставляя (24) и (25) в уравнения (22) и (23) получим

$$d_{\text{ГМ}} = a_0^{0,21} \cdot (Q_{\text{ср}}^{\text{ГМ}})^{0,368} \cdot \left(\frac{\frac{1}{4} \sqrt{\frac{S \cdot n}{q}}}{\Delta P_{\text{ГМ}}} \right)^{0,21}, \quad (26)$$

$$d_{\text{отв}} = a_0^{0,21} \cdot (Q_{\text{ср}}^{\text{отв}})^{0,368} \cdot \left(\frac{\frac{1}{2} \sqrt{\frac{S \cdot n_0}{q}} \left(\sqrt{\frac{n}{n_0}} - 1 \right)}{\Delta P_{\text{ГМ}} - \Delta P_{\text{ГМ}}} \right)^{0,21}, \quad (27)$$

Материальная характеристика газовой сети определяется по выражению

$$M = d_{\text{ГМ}} \cdot l_{\text{ГМ}} + d_{\text{отв}} \cdot l_{\text{отв}}, \quad (28)$$

$$M = a_0^{0,21} (Q_{\text{ср}}^{\text{ГМ}})^{0,368} \left(\frac{l_{\text{ГМ}}}{\Delta P_{\text{ГМ}}} \right)^{0,21} \cdot l_{\text{ГМ}} + a_0^{0,21} (Q_{\text{ср}}^{\text{отв}})^{0,368} \left(\frac{l_{\text{отв}}}{\Delta P_{\text{ГМ}} - \Delta P_{\text{ГМ}}} \right)^{0,21} \cdot l_{\text{отв}}. \quad (29)$$

Для нахождения оптимального распределения потерь давления между магистральным участком и ответвлением на расчетной ветке газопровода продифференцируем материальную характеристику сети M по управляющему параметру $\Delta P_{\text{ГМ}}$. В результате имеем

$$\Delta P_{\text{ГМ}}^{\text{opt}} = \frac{\Delta P}{1 + \left(\frac{(Q_{\text{ср}}^{\text{отв}})^{0,368} (l_{\text{отв}})^{1,21}}{(Q_{\text{ср}}^{\text{ГМ}})^{0,368} (l_{\text{ГМ}})^{1,21}} \right)^{-1,21}}, \quad (30)$$

$$\Delta P_{\text{отв}}^{\text{opt}} = \Delta P - \Delta P_{\text{ГМ}}^{\text{opt}}. \quad (31)$$

Средний диаметр расчетной ветки распределительного газопровода низкого давления определяем по формуле

$$d_{нд} = \frac{d_{гм}^{opt} \cdot l_{гм} + d_{отв}^{opt} \cdot l_{отв}}{l_{гм} + l_{отв}}. \quad (32)$$

где $d_{гм}^{opt}$, $d_{отв}^{opt}$ - оптимальные диаметры головной магистрали и ответвления. Определяются по формулам (26) и (27) путем подстановки (30) и (31).

Удельные дисконтированные затраты в газопроводы низкого давления определяются по формуле (12) путем подстановки (32). В результате имеем

$$\frac{z_{нд}}{n} = f(d_{нд}; l_{нд}) = f(n)_{нд}. \quad (33)$$

Рассмотрим более подробно топливную составляющую уравнения целевой функции [5,6].

Согласно [7, 8, 9] в условиях продолжительного режима работы расход газа $V_{ном}$, м³/ч, и теплопроизводительность газоиспользующей установки Q , МДж/ч, соотносятся следующим образом

$$V_{ном} = \frac{Q}{Q_P^H \eta_{ном}}, \quad (34)$$

где Q_P^H - низшая теплота сгорания газа, МДж/м³;

$\eta_{ном}$ - коэффициент полезного действия установки при продолжительной работе.

Приращение расходования природного газа за счет понижения КПД газоиспользующей установки с η_1^0 до η_1 , определяется выражением [5, 10]

$$\Delta V = V_{\Gamma}^0 - V_{\Gamma} = \frac{Q}{Q_P^H} \left(\frac{1}{\eta_{\Gamma}} - \frac{1}{\eta_{\Gamma}^0} \right), \quad (35)$$

где V_{Γ}^0 , V_{Γ} - объемы газа соответственно при отсутствии и при наличии гидравлического сопротивления в газопроводе, м³/ч;

η_{Γ} , η_{Γ}^0 - КПД газовой установки соответственно при отсутствии и при наличии гидравлического сопротивления в газопроводе.

Проведя преобразования с учетом (34), получим

$$\Delta V = V_{ном} \eta_{ном} \left(\frac{1}{\eta_{\Gamma}} - \frac{1}{\eta_{\Gamma}^0} \right). \quad (36)$$

Годовая стоимость дополнительно потребляемого газа определяется по формуле

$$\Delta T = C_{\Gamma} V_{ном} \tau_{год} \eta_{ном} \left(\frac{1}{\eta_{\Gamma}} - \frac{1}{\eta_{\Gamma}^0} \right), \quad (37)$$

ведем следующее обозначение

$$V_{ном} \tau_{год} = V_{год}, \quad (38)$$

тогда уравнение (2.52) примет следующий вид

$$\Delta T = C_{\Gamma} V_{год} \eta_{ном} \left(\frac{1}{\eta_{\Gamma}} - \frac{1}{\eta_{\Gamma}^0} \right), \quad (39)$$

где $V_{\text{год}}$ - годовой объем газа при длительной работе установки, $\text{м}^3/\text{год}$;

$C_{\text{г}}$ - удельная стоимость газа, $\text{руб}/\text{м}^3$;

$\tau_{\text{год}}$ - годовая продолжительность работы газоиспользующей установки, $\text{ч}/\text{год}$.

Подставляя (4), (5), (8), (30) в исходное уравнение целевой функции, получим целевую функцию задачи следующего вида

$$\frac{3}{n} = f(n)_{\text{грпш}} + f(n)_{\text{сд}} + f(n, \Delta P)_{\text{нд}} + f(\eta[P_{\text{г}}(\Delta P)])_{\Delta T} = f(n, \Delta P), \quad (40)$$

где $P_{\text{г}}$ - давление газа перед газоиспользующей установкой

$$P_{\text{г}} = P_{\text{ном}} - \frac{\Delta P_{\text{сч}} + \Delta P}{2}. \quad (41)$$

Запишем ограничения к целевой функции (2.55) в виде соотношений

$$N \geq 4; d_{\text{отв}} \geq 32\text{мм}; d_{\text{гм}} \geq 50\text{мм}; 0 < \Delta P \leq P_{\text{мин}}^{\text{р}}, \Delta P_{\text{гм}} + \Delta P_{\text{отв}} + \Delta P_{\text{вг}} = \Delta P, \quad (42)$$

где $P_{\text{мин}}^{\text{р}}$ - располагаемый минимальный перепад давлений в газопроводе, Па, [11, 12].

Первое ограничение следует из исходной постановки задачи (см. рис. 1). Два других ограничения учитывают технические требования к подземной прокладке уличных газопроводов.

Таким образом предложенная математическая модель по оптимальной централизации распределительных систем газоснабжения с многорядной застройкой селитебной территории, позволяет комплексно учесть структуру застройки населенного пункта, климатические условия эксплуатации, материал и способ прокладки газопровода, гидравлические режимы эксплуатации, тепловую эффективность использования газового топлива, режимы давления газа перед газоиспользующим оборудованием и неопределенность исходной экономической информации. Кроме того, предложенный математический аппарат позволяет корректировать расчетный перепад давления и получить более полное распределение перепада давления по участкам газовой сети и, как результат, снижение металлоемкости и общей стоимости строительства.

Список литературы

1. СП 62.13330.2011* Газораспределительные системы / Актуализированная версия СНиП 42-01-2002. ФАУ «ФЦС» – М.:, 2014. – 70 с.
2. Медведева, О.Н. Разработка энергосберегающих систем газоснабжения малых населенных пунктов на базе сжиженного углеводородного газа [Текст]: дис.канд. техн. наук/ О.Н. Медведева. - Саратов, 2000. - 226с.
3. Ионин, А.А. Газоснабжение [Текст]/ А.А.Ионин. - М.: Лань, 2012. - 439с.
4. Курицын, Б.Н. Оптимальная централизация систем газоснабжения от шкафных газорегуляторных пунктов [Текст]/ Б.Н. Курицын, О.Н. Медведева // Повышение эффективности систем теплогазоснабжения и вентиляции: Межвуз. научн. сб. - Саратов: Изд-во СГТУ, 1999. - С. 55-62.
5. Медведева, О.Н. Исследование тепловой эффективности водогрейных аппаратов, работающих на газовом топливе [Текст]/ О.Н. Медведева, Б.Н.Курицын, А.А.Иванов // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та, серия «Строительство и архитектура».- Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. - 2009. – выпуск 8. - №16. - С.54-57.
6. Медведева, О.Н. Энергоэкономическая эффективность оптимизации параметров

систем газоснабжения [Текст]/ О.Н. Медведева, Б.Н.Курицын, А.И.Иванов // «Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе»: Материалы международной конференции. - Саратов: СГТУ, 2013. - С. 193-197.

7. Иссерлин, А.С. Теория и практика сжигания газа [Текст]/ А.С.Иссерлин, М.И.Певзнер. - Л.: Недра, 1975. - 552с.

8. Иссерлин, А.С. Газовое отопление [Текст]/ А.С.Иссерлин. - Л.: Недра, 1979.-143с.

9. Лебедев, В.И. Расчет и проектирование теплогенерирующих установок систем теплоснабжения [Текст]/ В.И.Лебедев, П.А. Хаванов. - М.: Стройиздат, 1992.-360с.

10. Медведева О.Н. Повышение эффективности использования газового топлива [Текст]/ О.Н. Медведева, А.А.Иванов, Б.Н.Курицын//«Известия Самарского научного центра РАН». - Самара: Самарский научный центр РАН. - 2009. - Том11 (27). - №5 (2). - С. 284-286.

11. Медведева, О.Н. Располагаемый перепад давления в распределительных газовых сетях [Текст]/ О.Н. Медведева// «Энерго- и материалосберегающие энергетически чистые технологии»: Материалы IX Международной НТК. - Минск: Беларуская навука, 2012. - С. 92-96.

12. Медведева, О.Н. Технико-экономические исследования обоснования оптимального перепада давлений в распределительных газопроводах/ О.Н. Медведева, Б.Н.Курицын // «Перспективы развития науки и образования»: Сборник научных трудов по материалам Международной НПК. - Тамбов: ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2012. - С. 95-97.

УДК 697.34

Монах Светлана Игоревна,
к.т.н., доцент, доцент каф. ТТГВ;
Орлова Алла Яковлевна,
ст. преп. каф. ТТГВ;
Воробьева Ирина Валериевна,
магистрант гр.ЗТГВм-55а,
ДОННАСА - филиал НИУ МГСУ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА В НЕОДНОРОДНОЙ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ РЕБРАМИ

В данной статье с целью проведения теплотехнической оценки геометрических параметров неоднородной ограждающей конструкции, позволяющей найти оптимальное конструктивное решение с учетом оптимизации тепловых режимов и, в частности определить коэффициент теплотехнической однородности ограждающей конструкции, определена математическая модель стационарного теплопереноса в наружной ограждающей конструкции с металлическими ребрами. Для анализа температурных полей и тепловых режимов в такой конструкции использовался метод конформных отображений.

Ключевые слова: математическое моделирование, неоднородная ограждающая конструкция с металлическими ребрами, процесс теплопередачи, температурные поля, тепловые режимы, метод конформных отображений, функция комплексного переменного, коэффициент теплотехнической однородности.

Выполненный и представленный в различных публикациях обзор многочисленных и разнообразных применяемых в строительстве конструкций с теплопроводными включениями показал, что многообразие подобных ограждающих конструкций не позволяет предложить единого метода их теплотехнического расчета. Поэтому, с целью получения математического аппарата для расчета теплопереноса в одной из самых распространенных в настоящее время стеновых и кровельных конструкций – конструкций сэндвич-панелей поэлементной сборки, необходимо определить математическую модель стационарного процесса теплообмена в неоднородной ограждающей конструкции с металлическими ребрами.

В конструкции с металлическими ребрами важным является исследование влияния металлических ребер внутри плоской стенки на процесс теплопередачи.

В работе проведено моделирование теплообмена в конструкции сэндвич-панелей поэлементной сборки производства фирмы «Металлпрофиль», предназначенных для тепловой изоляции стеновых и кровельных конструкций [1]. Вид конструкции сэндвич-панелей представлен на рис. 1.

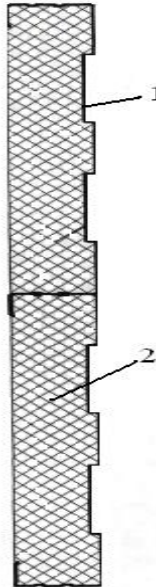
Для анализа температурных полей и тепловых режимов в такой конструкции использовался метод конформных отображений.

Конформные отображения связаны с теорией функций комплексного переменного и представляют собой удобный математический аппарат для решения задач теплопереноса.

Теория конформных отображений и ее практическое применение излагаются во многих работах [2, 3, 4]. В принципе конформное отображение это – взаимно однозначное отображение области D на область D^* (евклидова пространства или риманова многообразия)

называется конформным (лат. *conformis* — подобный), если в окрестности любой точки D главная линейная часть этого преобразования есть ортогональное преобразование.

В справочнике по конформным отображениям [4] основное внимание уделяется практическим приемам нахождения отображаемых функций и приведен каталог часто применяемых конформных отображений, некоторые из них и были использованы в настоящей работе.



1 – металлический профиль; 2 – плитный утеплитель

Рисунок 1 - Разрез сэндвич-панели поэлементной сборки с установленным утеплителем

В настоящей работе исследовано влияние металлических ребер внутри плоской стенки толщиной H на процесс теплопередачи сэндвич-панелях поэлементной сборки.

Предполагается, что тонкие металлические ребра обладают высокой теплопроводностью и имеют небольшую высоту h , поэтому принимаем температуру этих ребер, равной температуре металлических листов, к которым прикреплены эти ребра. Пространство под листами заполнено теплоизоляционным материалом с коэффициентом теплопроводности λ . Известны температура окружающей среды t_1 и температура поверхности стенки со стороны ребер t_2 .

На рисунке 2 показаны изотермы и линии теплового потока внутри оребренной стенки.

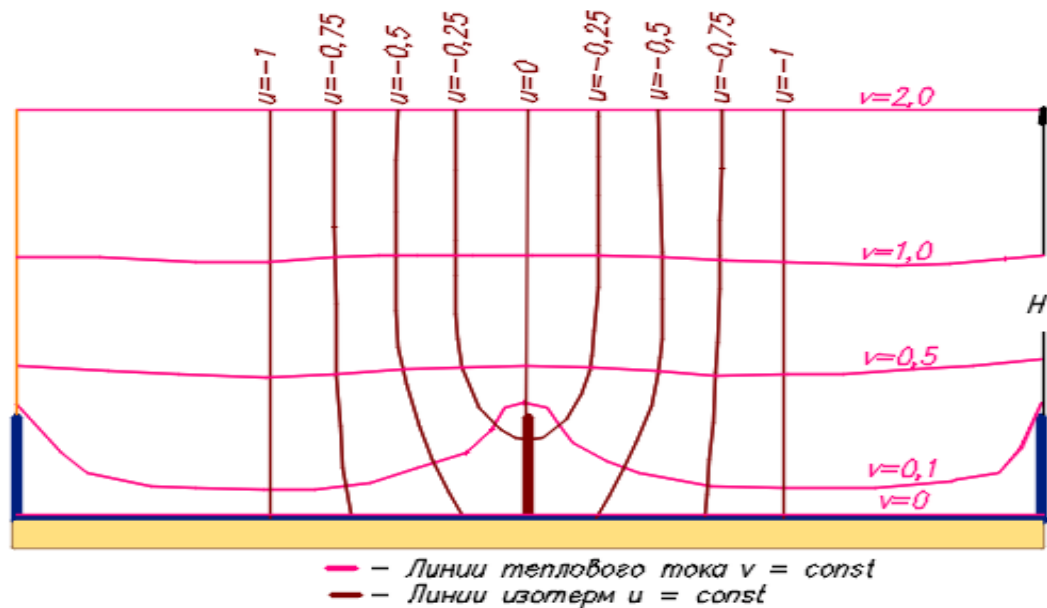


Рисунок 2 – Линии изотерм, обозначенные $u = \text{const}$,
и линии теплового тока, обозначенные $v = \text{const}$

Руководствуясь справочным пособием [5] принимаем, что внешнее термическое сопротивление теплоотдаче (R_n) можно учесть заменой величины H суммой $\left(H + \frac{\lambda}{\alpha}\right) = L$, где α – коэффициент теплоотдачи с поверхности стенки в окружающую среду.

Тогда задача теплопереноса через оребренную стенку может быть решена при граничных условиях I рода, т.е. на поверхностях неоднородной стенки толщиной L поддерживаются постоянные температуры t_1 и t_2 .

Одним из эффективных методов решений задач стационарной теплопроводности является метод конформного отображения.

Суть конформного отображения для процессов теплопереноса заключается в следующем. Заданы области D и D^* : требуется построить функцию, осуществляющую конформное отображение одной из этих областей на другую [6].

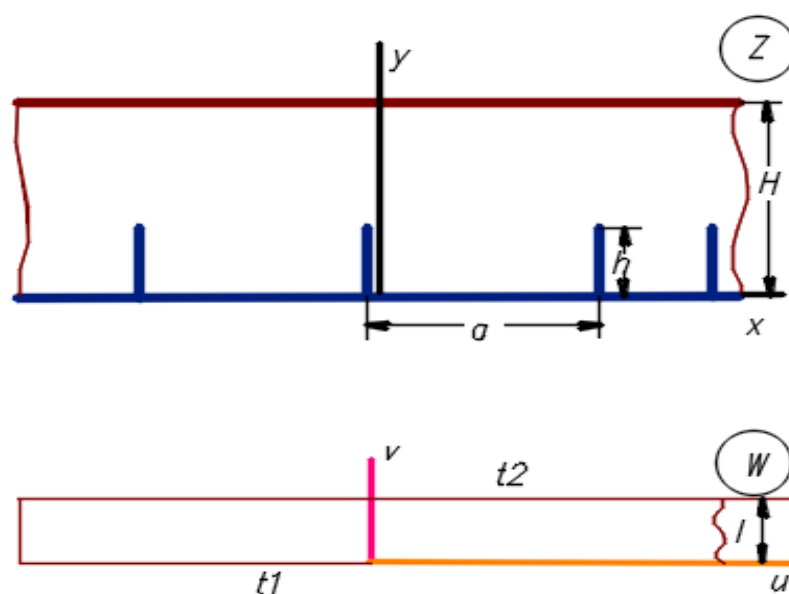


Рисунок 3 – Конформное отображение оребренной стенки на однородную
Если принять $h = 0$ и использовать известные преобразования

Функция, переводящая орбренную плоскую стенку в однородную (рис.3) имеет вид [6]

$$W = \frac{a}{\pi} \arccos \left(\frac{1}{ch \frac{\pi h}{a}} \cdot \cos \frac{\pi Z}{a} \right) \quad (1)$$

где

$$Z = x + iy, \quad (2)$$

$$W = u(x,y) + iv(x,y) \quad (3)$$

a – расстояние между ребрами.

Преобразование (1) отображает изотерму ($y = L$) плоскости Z в прямую $v = l$ плоскости W .

Плотности тепловых потоков, проходящих через области между изотермами t_1 и t_2 на той и другой плоскостях, и в соответствии со свойствами конформных изображений, будут равны

$$q = \frac{\lambda}{l} (t_1 - t_2) \quad (4)$$

Подставляя значения из (2) и (3) в (1), после преобразований получим

$$l = v_{x=0}^{y=L} = \frac{a}{2\pi} \ln \frac{1}{ch \frac{\pi h}{a}} \left(ch \frac{\pi}{a} L + \sqrt{ch^2 \frac{\pi}{a} L - ch^2 \frac{\pi h}{a}} \right)^2 \quad (5)$$

Если принять $h = 0$ и использовать известные преобразования

$$\begin{aligned} \sqrt{ch^2 \frac{\pi}{a} L - 1} &= sh \frac{\pi}{a} L, \\ \left(ch \frac{\pi}{a} L + sh \frac{\pi}{a} L \right)^2 &= \exp \left(\frac{2\pi}{a} \right) L. \end{aligned}$$

Как частный случай уравнения (5) получим $l = L$.

Проведем сравнение температур и тепловых потоков, проходящих через орбренную и однородную стенки одинаковой толщины, равной L .

Тепловой поток выражаем как

$$q = \frac{\lambda}{L} (t_1^* - t_2) \quad (6)$$

где t_1^* - температура гладкой плоской стенки, °С.

Из (4) и (6) найдем

$$\Delta t = t_1^* - t_1 = \frac{q}{\lambda} \cdot (L - l)$$

Или с учетом (5)

$$\Delta t = \frac{q}{\lambda} \cdot \left[L - \frac{a}{2\pi} \ln \frac{1}{ch \frac{\pi h}{a}} \left(ch \frac{\pi}{a} L + \sqrt{ch^2 \frac{\pi}{a} L - ch^2 \frac{\pi h}{a}} \right)^2 \right] \quad (7)$$

Плотность теплового потока для оребренной стенки определяется уравнениями (4) и (5), а для однородной стенки без ребер

$$q^* = \frac{\lambda}{L} (t_1 - t_2) \quad (8)$$

Тогда

$$\begin{aligned} \Delta q &= q - q^* = \lambda \cdot (t_1 - t_2) \cdot \left(\frac{L - l}{L \cdot l} \right) = \\ &= \frac{\lambda \cdot (t_1 - t_2)}{l} \cdot \left[1 - \frac{a}{2\pi} \ln \frac{1}{ch \frac{\pi h}{a}} \left(ch \frac{\pi}{a} L + \sqrt{ch^2 \frac{\pi}{a} L - ch^2 \frac{\pi h}{a}} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (9)$$

Или

$$\delta q = \frac{q - q^*}{q} \cdot 100\% \quad (10)$$

Коэффициент теплотехнической однородности оребренной стенки может быть определен по формуле

$$r = \frac{q^*}{q} \quad (11)$$

Уравнения (9) и (10) позволяют оценить тепловой режим оребренной стенки в сравнении с тепловым режимом гладкой стенки в зависимости от высоты ребер h и расстояния между ними a .

Таким образом, предложенная математическая модель дает возможность производить теплотехническую оценку геометрических параметров конструкции, что позволяет найти оптимальное конструктивное решение с учетом оптимизации тепловых режимов и, в частности определить коэффициент теплотехнической однородности ограждающей конструкции с металлическими ребрами.

Список литературы

1. Альбом технических решений. Конструкции стеновых и кровельных сэндвич-панелей поэлементной сборки. – М.: Металл Профиль, 2009. – 113 с.
2. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. – М.: Наука, 1973. – 416 с.
3. Коппенфельс В., Штальман Ф. Практика конформных отображений. – М.: Изд-во иностр. Лит., 1963. – 406 с.
4. Лаврик В.И., Савенков В.Н. Справочник по конформным отображениям. К.: Наукова думка, 1970. – 252 с.
5. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
6. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного. – М.: ГИФМЛ, 1958. – 678 с.

УДК 697.34

Монах Светлана Игоревна,
к.т.н., доцент, доцент каф. ТТГВ;
Орлова Алла Яковлевна,
ст. преп. каф. ТТГВ;
Воробьева Ирина Валериевна,
магистрант гр.ЗТГВм-55а,
ДОННАСА - филиал НИУ МГСУ

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЙ ОДНОРОДНОСТИ ДЛЯ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ С ТЕПЛОПРОВОДНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

В данной статье с целью исследования влияния металлических ребер на тепловой режим наружной ограждающей конструкции, проведены численные исследования коэффициента теплотехнической однородности конструкции с металлическими ребрами. В результате численных исследований установлено, что высота ребер оказывает значительное влияние на коэффициент теплотехнической однородности. Так при неизменном расстоянии между ребрами $a = 0,07$ м увеличение высоты ребер от 0,01 м до 0,1 м приводит к уменьшению коэффициента теплотехнической однородности от 0,99 до 0,79 и увеличению тепловых потерь на 20,6%.

Ключевые слова: теплопроводные включения, температурное поле, металлические ребра, метод конформных отображений, коэффициент теплотехнической однородности, математическая модель, стационарный процесс теплообмена, численные исследования, тепловые потери.

Местные понижения температуры на обращенной в помещение поверхности неоднородной ограждающей конструкции, имеющей конструктивные включения из материалов с относительно большей теплопроводностью, чем основная масса материала, могут привести не только к росту теплопотерь через наружное ограждение, но и к образованию конденсата на его внутренней поверхности.

Таковыми теплопроводными включениями являются элементы бетонного, железобетонного или стального каркасов; в железобетонных слоистых панелях - неутепленные обрамления и контурные ребра жесткости; в утепленных, пустотных и засыпных каменных конструкциях - связующие ряды кладки (например, прокладные ряды), включения плотного материала между пустотами или отдельными участками утепления, сквозные швы тяжелых растворов, применяемых при укладке камней или плит из малотеплопроводных материалов.

В общем случае распределение температур в одной из проекций (чаще всего в плане) конструкции с теплопроводными включениями может быть установлено построением плоского температурного поля на основе численного решения дифференциального уравнения Лапласа. Однако для теплопроводных включений простейшей формы, пересекающих всю толщину ограждающей конструкции или половину ее, существуют приближенные инженерные расчеты [1, 2], позволяющие судить о достаточности теплозащитных свойств конструкции.

Основой для разработки таких инженерных методов расчета послужили многочисленные построения двумерных температурных полей ограждающих конструкций, пересекаемых элементами железобетонного каркаса. Обобщение результатов этих построений реализовано в таблицах элементов с теплопроводными включениями, приведенными в нормативных документах [1, 2] и в составляемых авторами каталогах теплопроводных включений.

Приведенные в [1, 2] приближенные способы теплофизических расчетов теплопроводных включений относятся к однородным ограждающим конструкциям с теплопроводными включениями простейшей геометрической формы и при этом расположенными на значительном удалении друг от друга, что исключает влияние соседних включений на процессы перетекания тепла.

Для других видов ограждающих конструкций и более сложной формы или более близкого расположения теплопроводных включений, что часто встречается в практике проектирования и строительства, простых расчетных формул не существует.

В настоящей работе проведено исследование влияния металлических ребер на тепловой режим наружной ограждающей конструкции. Моделирование процессов теплопереноса выполнено с использованием метода конформных отображений. Суть конформного отображения в данном случае заключается в том, что исследуемая область со сложными границами отображается на другую простейшую область, для которой температурные поля и тепловые потоки известны [3].

В нормативном документе [2] для определения приведенного сопротивления теплопередаче неоднородных ограждающих конструкций с теплопроводными включениями, вводится понятие коэффициента теплотехнической однородности.

Нормативный документ [2] для определения приведенного сопротивления теплопередаче неоднородных ограждающих конструкций с теплопроводными включениями рекомендует определять коэффициент теплотехнической однородности по формуле

$$R_0^r = R_0^{con} \cdot r \quad (1)$$

где R_0^r – приведенное сопротивление теплопередаче участка ограждающей конструкции, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$;

R_0^{con} – приведенное сопротивление теплопередаче i -того участка однородной ограждающей конструкции, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$;

r – коэффициент теплотехнической однородности i -того участка ограждающей конструкции, учитывающий влияние стыков, откосов, проемов, обрамляющих ребер, гибких связей и других теплопроводных включений.

Для некоторых элементов ограждающих конструкций с теплопроводными включениями, приведенных в [2] коэффициент теплотехнической однородности рекомендуется определять по формуле

$$r = \left[1 + \frac{1}{A} \cdot \sum_{i=1}^m \left(\frac{R_{0,i}^{con}}{R_{0,i}'} \right) \cdot \delta_i C_i k_i \right]^{-1} \quad (2)$$

где A – общая площадь конструкции, равная сумме площадей отдельных участков, м^2 ;

m – число теплопроводных включений в конструкции;

δ_i – ширина i -того теплопроводного включения, м ;

C_i – длина i -того теплопроводного включения, м ;

$R_{0,i}'$ – сопротивление теплопередаче i -того теплопроводного включения, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$;

$R_{0,i}^{con}$ – сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции вдали от i -того теплопроводного включения, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$;

k_i – определяется по формуле

$$k_i = 1 + \frac{\psi_i L_i^2}{\lambda_i \cdot \delta_i \cdot R_{0,i}^{con}} \quad (3)$$

где ψ_i – коэффициент, зависящий от типа теплопроводного включения;

L_i – толщина утеплителя i -того участка ограждающей конструкции, м ;

λ_i - коэффициент теплопроводности утеплителя i -того участка ограждающей конструкции, Вт/м·К.

Метод расчета неоднородных конструкций с теплопроводными включениями, изложенный в [2], применим к ограниченному числу конструкций, и не позволяет определять коэффициенты теплотехнической однородности для всего многообразия современных наружных ограждений. В связи с этим значительное развитие получили исследования проблем расчета теплопереноса в подобных конструкциях.

Расчету многослойных ограждений с гибкими металлическими связями посвящена работа [4]. Авторами разработана методика расчета теплового состояния многослойных наружных ограждений с коннекторами. На основании проведенных численных исследований определены коэффициенты теплотехнической однородности трехслойных ограждений.

Теплотехнический анализ одного из вариантов трехслойных стен, выполненных с использованием коннекторов, приведен в работе [5], в которой получены расчетные зависимости для определения приведенного термического сопротивления наружной стены с коннекторами, укрепляющими в стене слой утеплителя.

Расчеты произведены для конструкции с внутренним несущим кирпичным слоем толщиной 510 мм, наружным кирпичным слоем толщиной 120 мм и слоем утеплителя между ними толщиной 100 мм с коэффициентом теплопроводности 0,03 Вт/м·К. Теплопроводность кирпичной кладки принята равной 0,81 Вт/м·К. Число металлических коннекторов на 1 м² стены равно пяти.

Авторами получена графическая зависимость термического сопротивления стены от отношения толщины конструкции кирпичной стены к глубине заложения коннекторов. Кроме того установлено, что при использовании стальных коннекторов толщина утепляющего слоя должна быть увеличена в 1,05 ÷ 1,38 раз (в зависимости от глубины заложения коннекторов).

В работе [6] создан приближенный метод расчета стеновых конструкций со стержневыми связями. Были определены зависимости приведенного сопротивления теплопередаче от диаметра и шага раскладки металлических связей, коэффициентов теплопроводности материалов и толщин внутреннего несущего и утепляющего слоев. Задача решалась довольно сложно, путем нахождения трехмерного температурного поля с последующим определением тепловых потоков и коэффициентов теплотехнической однородности, позволяющих оценить долю приведенного сопротивления теплопередаче конструкции со связями от условного сопротивления теплопередаче конструкции без металлических включений. Также доказано большое влияние диаметра связей и шага их раскладки на коэффициент теплотехнической однородности.

В результате проведенного исследования были найдены значения локальных коэффициентов теплотехнической однородности для конструктивных слоев и слоя утеплителя. Полученные зависимости позволяют рассчитать приведенное сопротивление теплопередаче многослойного ограждения с металлическими связями

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \sum_i \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \sum_j \frac{r_j \cdot \delta_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}} \quad (4)$$

где i – номер слоя без связи;

j - номер слоя со связью;

δ – толщина слоя, м;

λ – коэффициент теплопроводности слоя, Вт/м·К.

В последнее время в строительстве широкое распространение получили конструкции фасадов с вентилируемыми воздушными прослойками, в которых используются различные металлические включения.

Влияние металлических связей на коэффициент теплотехнической однородности навесных фасадов рассматривается в работе [7].

На рис. 1 показано влияние площади поперечного сечения кронштейнов на коэффициент теплотехнической однородности. Приведенные в [7] данные доказывают существенное влияние количества, расположения и материала кронштейнов на теплозащитные качества ограждения в целом.

Обзор многочисленных и разнообразных применяемых в строительстве конструкций с теплопроводными включениями показал, что многообразие подобных ограждающих конструкций не позволяет предложить единого метода расчета их коэффициента теплотехнической однородности.

Поэтому в настоящей работе выполнено исследование одной из самых распространенных в настоящее время стеновых и кровельных конструкций – конструкций сэндвич-панелей поэлементной сборки.

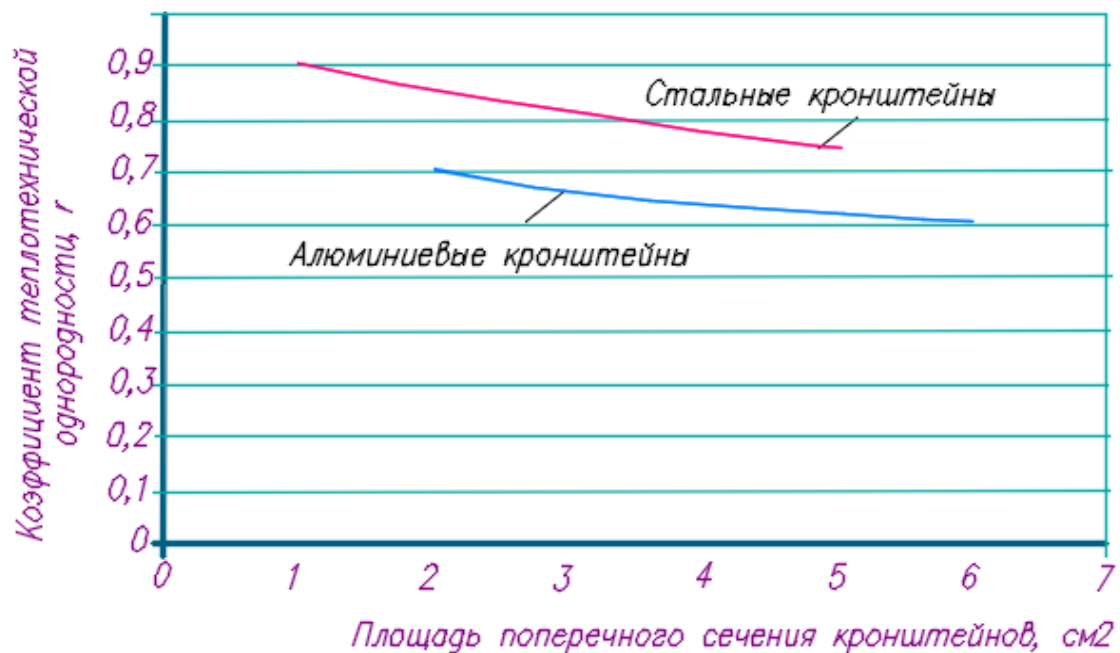


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента теплотехнической однородности от площади поперечного сечения кронштейнов при количестве – 2 кронштейна на 1 м² фасада

На основании математической модели стационарного процесса теплообмена в неоднородной ограждающей конструкции с металлическими ребрами, созданной на основе использования метода конформного отображения, в настоящей работе предложена методика расчета коэффициента теплотехнической однородности подобных конструкций. Алгоритм расчета коэффициента теплотехнической однородности конструкции с металлическими ребрами приведен на рисунке 2.

Исходные данные для численных исследований следующие.

Длина конструкции – 0,5 м.

Ширина конструкции – 1 м.

Толщина тепловой изоляции $L = 0,20$ м.

Коэффициент теплопроводности тепловой изоляции $\lambda = 0,07$ Вт/м·К.

Оребренная пластина выполнена из стали толщиной $\delta = 0,002$ м с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 58$ Вт/м·К.

Высота ребер $h = 0,06$ м и расстояние между ними $a = 0,07$ м.

Температура внутреннего воздуха принята $t_1 = 20$ °С.

Температура наружного воздуха принята равной минимальной из теоретически возможных для г. Донецка $t_{5^{0,98}} = -25$ °С.

Было проведено конформное преобразование согласно соотношению

$$l = v_{x=0} = \frac{a}{2\pi} \ln \frac{1}{ch \frac{\pi h}{a}} \left(ch \frac{\pi}{a} L + \sqrt{ch^2 \frac{\pi}{a} L - ch^2 \frac{\pi h}{a}} \right)^2 \quad (5)$$

Где использованы известные преобразования [3]:

$$\sqrt{ch^2 \frac{\pi}{a} L - 1} = sh \frac{\pi}{a} L,$$

$$\left(ch \frac{\pi}{a} L + sh \frac{\pi}{a} L \right)^2 = \exp \left(\frac{2\pi}{a} \right) L,$$

Получено расчетом: $l = 0,18$ м.

Плотность теплового потока через ребренную неоднородную стенку

$$q = \frac{\lambda}{l} (t_1 - t_2) = \frac{0,07}{0,18} (20 - (-25)) = 17,73 \text{ Вт/м}^2$$

Плотность теплового потока для конструкции без металлических ребер

$$q^* = \frac{\lambda}{L} (t_1^* - t_2) = \frac{0,07}{0,2} (20 - (-25)) = 15,75 \text{ Вт/м}^2$$

Разность тепловых потоков

$$\Delta q = q - q^* = 1,98 \text{ Вт/м}^2$$

Перепад температур вычисляется по соотношению

$$\Delta t = \frac{q}{\lambda} \cdot \left[L - \frac{a}{2\pi} \ln \frac{1}{ch \frac{\pi h}{a}} \left(ch \frac{\pi}{a} L + \sqrt{ch^2 \frac{\pi}{a} L - ch^2 \frac{\pi h}{a}} \right)^2 \right] = 5,66 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Погрешность в определении тепловых потоков между однородной и неоднородной конструкциями вычисляется по (3.14)

$$\delta q = \frac{17,73 - 15,75}{17,73} \cdot 100\% = 11,16\%$$

Коэффициент теплотехнической однородности конструкции

$$r = \frac{q^*}{q} = \frac{15,75}{17,73} = 0,89$$

На основании разработанной методики расчета коэффициента теплотехнической однородности конструкций с металлическими ребрами проведены численные исследования зависимости коэффициента теплотехнической однородности r от высоты ребер h и расстояния между ребрами a . Эта зависимость приведена на рисунке 3.

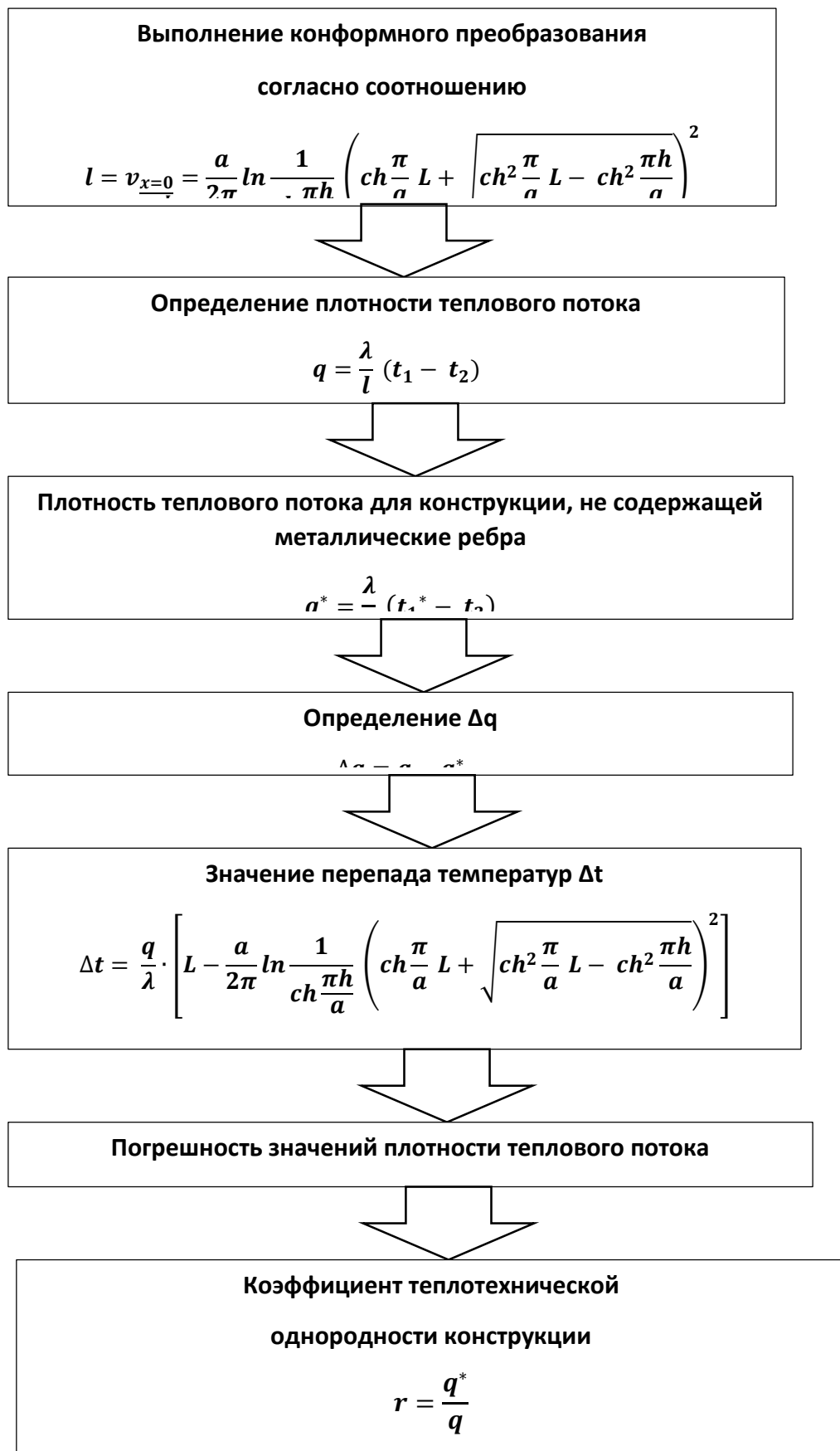


Рисунок 2 – Алгоритм расчета коэффициента теплотехнической однородности конструкции с металлическими ребрами

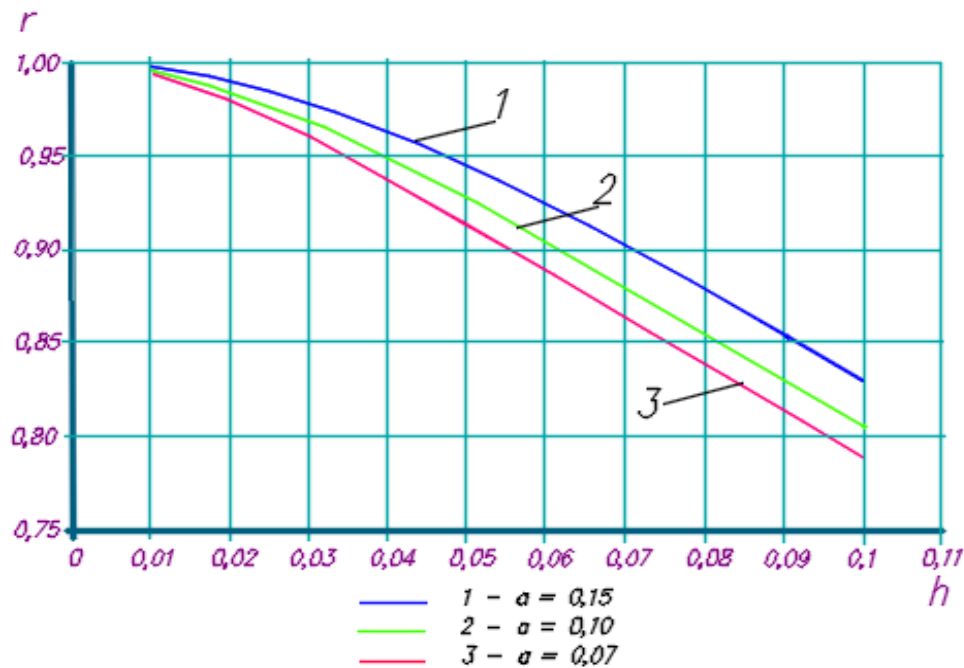


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента теплотехнической однородности r от высоты ребер h

Как следует из приведенной зависимости, высота ребер оказывает значительное влияние на коэффициент теплотехнической однородности. Так при неизменном расстоянии между ребрами $a = 0,07$ м увеличение высоты ребер от 0,01 м до 0,1 м приводит к уменьшению коэффициента теплотехнической однородности от 0,99 до 0,79 и увеличению тепловых потерь на 20,6%.

Следовательно, наличие металлических включений в ограждающих конструкциях может заметно увеличить величину и изменить характер тепловых потерь.

Список литературы

1. СП 50.13330.2024. Свод правил. Тепловая защита зданий. – Москва: ФГУП ЦПП, 2024. 118 с.
2. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий. – М: ФГУП ЦПП, 2004.
3. Лаврик В.И., Савенков В.Н. Справочник по конформным отображениям. К.: Наукова думка, 1970. – 252 с.
4. Мирошниченко Т.А., Кузин А.Я., Цветков Н.А. Хуторной А.Н. Влияние коннектора на тепловое состояние трехслойного наружного ограждения. // Материалы международной научно-технической конференции Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции. МГСУ 2005. С. 64 – 68.
5. Хуторной А.Н., Колесникова А.В. Оценка влияния глубины заложения и теплопроводности коннекторов на теплопроводные свойства кирпичных и керамзитобетонных стен. // Известия вузов. Строительство. 2004. № 10.
6. Малявина Е.Г., Бибик М.В. Инженерная методика определения приведенных сопротивлений теплопередаче наружных стен со стержневыми связями. // АВОК 2007. №3.
7. Гагарин В.Г., Козлов Е.В., Цыкановский Е.Ю. Теплозащита фасадов с вентилируемым воздушным зазором. Часть 2. // АВОК 2004 №3.

УДК 697.34+662.997:697.7

Монах Светлана Игоревна,
к.т.н., доцент, доцент каф. ТТГВ;
Красникова Виктория Владимировна,
магистрант гр. ЗТГВм-55а,
ДОННАСА – филиал НИУМГСУ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕЛИОГРУНТОВОЙ ТЕПЛОСНАБЖАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ С АККУМУЛИРОВАНИЕМ ТЕПЛОТЫ

В данной статье с целью разработки математического аппарата для решения конкретных практических задач комплексного использования солнечного и грунтового нетрадиционных источников теплоты предложена математическая модель основных тепловых потоков в биструктурной комплексной системе теплоснабжения. Анализ объекта моделирования – КСТ позволил выполнить его декомпозицию на пять основных составляющих элементов, а именно: традиционный источник теплоты, солнечный источник теплоты, грунтовый источник теплоты, трансформатор температурного потенциала (теплонасосная установка) с двумя испарителями солнечным и геотермальным и собственно объект теплоснабжения. При этом грунт используется в качестве аккумулятора теплоты и моделирование процесса нестационарного теплообмена в грунтовом аккумуляторе требует отдельных исследований.

Ключевые слова: математическое моделирование, гелиогрунтовая теплоснабжающая система, аккумулятирование теплоты, комплексное использование, нетрадиционные источники теплоты, тепловые потоки, декомпозиция, биструктурная схема, теплонасосная установка, объект теплоснабжения, грунтовой аккумулятор

Наибольший интерес для организации аккумулятирования теплоты в теплоснабжающих системах представляет комплексная гелиогрунтовая теплонасосная система [1-3]. Исследования, проведенные авторами [4-7], показали их высокую энергетическую и экономическую эффективность.

В результате анализа опубликованных исследований систем теплоснабжения с использованием одного возобновляемого источника энергии на базе теплонасосных технологий (моноструктурных систем) [4-7] и исследований систем с двумя возобновляемыми источниками – солнечной и грунтовой энергии (биструктурных систем) [6-9], можно сделать вывод, что последняя комплексная система теплоснабжения (КСТ) эффективнее в энергетическом и экономическом отношении.

Условно биструктурную КСТ можно представить в виде блок-схемы (рис. 1), состоящей из нескольких подсистем, каждая из которых влияет на эффективность ее работы в целом:

- возобновляемые источники энергии - энергия солнца и грунта;
- комплексная биструктурная система теплоснабжения;
- объект теплоснабжения - потребитель.

Главный элемент блок-схемы - биструктурная комплексная система теплоснабжения, в которой происходит преобразование в тепловую энергию (с использованием теплонасосного цикла) низкопотенциальной первичной энергии, поступающей от двух возобновляемых источников и используется для целей теплоснабжения потребителя (объекта теплоснабжения). Первый выходной элемент блок-схемы предполагает наличие двух разнородных по

энергетическим ресурсам источников возобновляемой энергии - солнечной и грунтовой энергии.

В этом случае грунт выступает еще и как аккумулятор тепла. КСТ является интегрированной полиэлементной структурой, которая состоит из нескольких автономных структур, работающих, в свою очередь, независимо (в моноструктурном режиме) или совместно (в биструктурном режиме), при различном соединении ее основных элементов (рисунок 2).

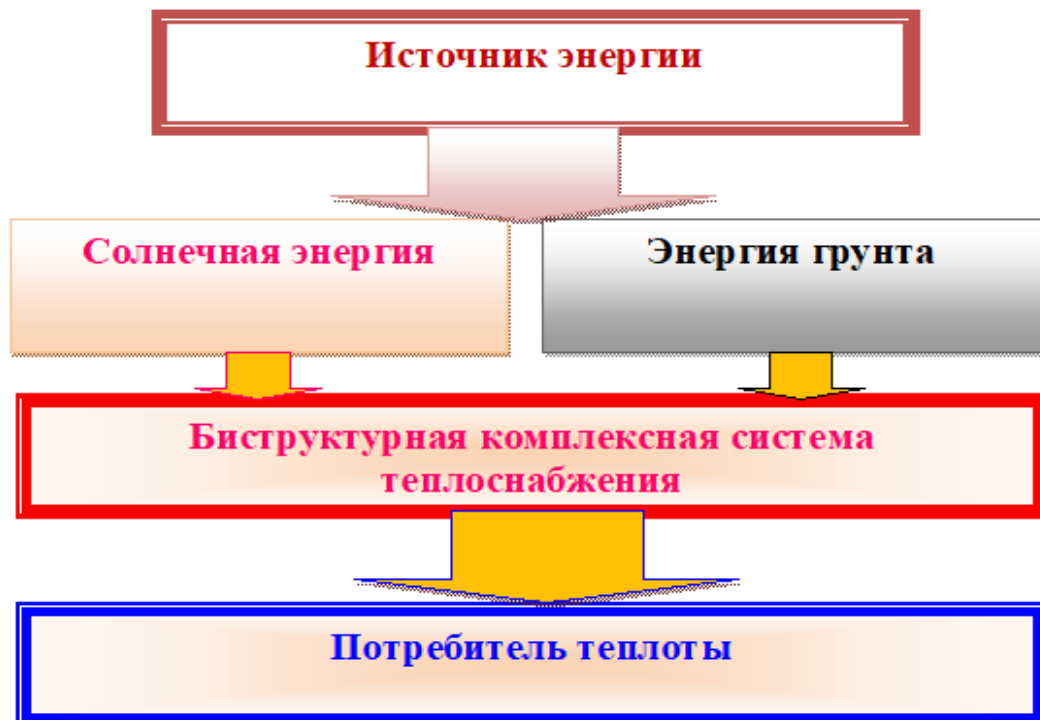
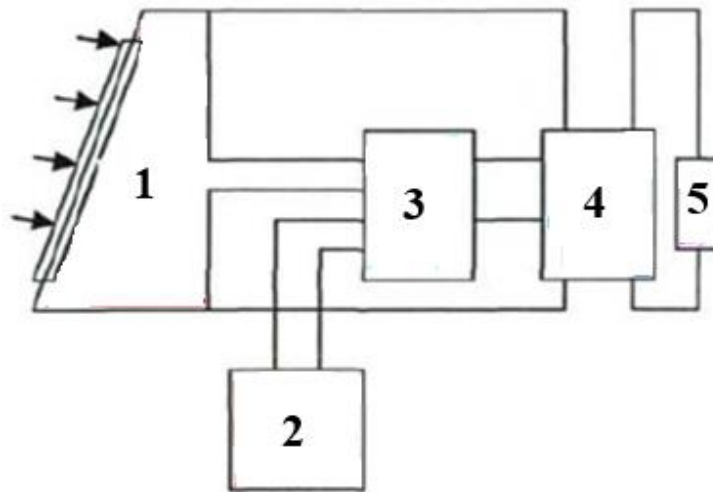


Рисунок 1 – Блок - схема КСТ

В солнечной системе 1 происходит поглощение и аккумуляция солнечного излучения. Солнечный контур, кроме солнечного коллектора, содержит собственный аккумулятор теплоты, насосы, регулирующие клапаны, фильтры, теплообменники и системы контрольно-измерительных приборов и автоматики.

В моноструктурном режиме работы по замкнутой схеме солнечная система 1 используется для отопления. Тепловая энергия может передаваться потребителю непосредственно от бака-аккумулятора, либо с использованием трансформатора теплоты - теплового насоса 3, что обеспечивает повышение температурного потенциала теплоносителя на входе в контур теплового потребителя 4. В моноструктурном режиме работы почвенной системы 2 грунтовые теплообменники отбирают теплоту, аккумулированную в почве, и передают ее тепловому потребителю 4 на более высоком уровне, что осуществляется с помощью теплового насоса 3.

Биструктурная система теплоснабжения позволяет использовать совместно два разнородных возобновляемых источников энергии, которые по своим природным свойствам способны, в случае дефицита, к взаимной компенсации друг друга и некоторого сглаживания неравномерности теплопотребления еще и за счет аккумуляции теплоты.



1 - солнечный источник теплоты (СИТ); 2 – грунтовый источник теплоты (ГИТ);
3 - трансформатор температурного потенциала возобновляемых источников (тепловой насос); 4 - объект-потребитель теплоты (система теплоснабжения); 5 - традиционный источник теплоты (ТИТ).

Рисунок 2 - Обобщенная принципиальная схема КСТ

В биструктурной конфигурации КСТ, благодаря наличию двух испарителей теплового насоса, создаются благоприятные условия для утилизации низкопотенциальной энергии, поступающей от двух независимых природных источников - солнца и грунта. В этом случае тепловой насос выполняет роль трансформатора теплоты одновременно для обоих источников возобновляемой энергии.

Анализ схем комплексных гелиогрунтовых, теплонасосных систем биструктурной конфигурации показал, что они перспективны как в энергетическом, так и в экономическом отношении и представляют интерес для энергосберегающих технологий.

В случае дефицита возобновляемой энергии и недостаточной мощности теплового насоса конфигурация КСТ предусматривает возможность включения в работу резервного источника традиционной энергии для обеспечения нагрузки теплового потребителя. Поскольку система теплоснабжения на основе возобновляемых источников энергии является низкопотенциальной (температурный уровень теплоносителя 40 ... 50 ° С), должно быть предусмотрено использование отопительных приборов с увеличенной поверхностью нагрева. Как резервный источник энергии для такой системы теплоснабжения целесообразно принять электрический котел (или панельное лучистое отопление), который включается в работу в случае дефицита возобновляемой энергии, когда невозможно поддерживать тепловые требования потребителя на должном уровне.

Третий элемент блок-схемы КСТ - объект-потребитель теплоты, которым является отдельное производственное или жилое здание, запроектированные с соблюдением соответствующих нормативных требований.

Анализ объекта моделирования – КСТ позволяет выполнить его декомпозицию на пять основных составляющих элементов, а именно: традиционный источник теплоты, солнечный источник теплоты, грунтовый источник теплоты, трансформатор температурного потенциала (теплонасосная установка) с двумя испарителями солнечным и геотермальным и собственно объект теплоснабжения.

Полезная теплота, которая отводится рабочим телом солнечного источника теплоты (гелиоколлектора - ГК) и используется для теплоснабжения потребителя, определится по формуле [3,4]

$$Q_{ГК} = A_{ГК} \cdot F_R \cdot [(\tau\alpha) \cdot H - K_{ГК} \cdot (T_i - T_H)] \quad (1)$$

где $Q_{ГК}$ - тепловая производительность солнечного коллектора, Вт;

$A_{ГК}$ - площадь солнечного коллектора, м²;

$\tau\alpha$ - приведенный оптический коэффициент;

H - плотность потока солнечного излучения, которое поступает на поверхность ГК, Вт/м²;

$K_{ГК}$ - полный коэффициент потерь энергии (теплопередачи), Вт/м²·К;

T_i - температура рабочего тела на входе в ГК, К;

T_H - температура окружающей среды, К;

F_R - эффективный коэффициент отвода теплоты от ГК, равный отношению фактической полезной энергии ГК к полезной энергии при условии, что температура поглотительной поверхности (абсорбера) T_c равна температуре жидкости на входе в коллектор T_i . F_R зависит от конструктивных особенностей ГК и условий его работы (в том числе от климатических условий).

Уравнение баланса энергии аккумулятора теплоты (АК) имеет вид

$$V_B \cdot c_p \cdot \rho_B \cdot \frac{dT_B}{dt} = Q_{вх}(t) - Q_{вых}(t) - Q_{вых}(t) \quad (2)$$

где V_B - объем воды в баке аккумулятора, м³;

c_p - изобарная теплоемкость теплоносителя, кДж/кг·К;

ρ_B и T_B - плотность, кг/м³ и температура, К воды в баке;

$Q_{вх}(t)$ и $Q_{вых}(t)$ - тепловая мощность (тепловой поток) соответственно на входе и на выходе из АК, Вт;

$Q_{вых}(t)$ - потери в окружающую среду, Вт.

Для расчета теплосъема в грунтовом теплообменнике можно использовать критериальное уравнение для вынужденной конвекции при ламинарном течении в каналах

$$Nu = 1,86 \cdot \left(\frac{\mu_j}{\mu_w}\right)^{0,14} \cdot \left(\frac{Re \cdot Pr \cdot d_r}{L}\right)^{0,33} \quad (3)$$

где Nu - число Нуссельта, безразмерный коэффициент теплоотдачи;

Re - число Рейнольдса;

Pr - число Прандтля;

d_r - гидравлический диаметр грунтового теплообменника (ГТ), м;

μ_j и μ_w - соответственно, динамическая вязкость теплоносителя при его средней температуре и при средней температуре ГТ, кг/м·с;

L - длина участка, м.

Поток теплоты, подводимый к рабочему телу грунтового испарителя теплового насоса по n грунтовым трубкам определится

$$Q_{ТН}|_{t=t_i} = w_m \cdot c_p \cdot n \cdot (T_{f,0}|_{t=t_i} - T_{f,1}|_{t=t_i}) \quad (4)$$

где $T_{f,0}$ - начальная температура рабочего теплоносителя ГТ на входе в грунтовой испаритель ТН, К;

$T_{f,1}$ - конечная температура рабочего теплоносителя ГТ на выходе из грунтового испарителя ТН, К.

В случае работы теплового насоса с грунтовым контуром КСТ, показатель эффективности теплового насоса рассчитывается по формуле

$$\varepsilon_{\text{ТН}}^{\text{гр}} = \eta_{\text{к}} \cdot \frac{\Delta\vartheta_{\text{к}} + T_{\text{в}}^{\text{от}}}{\Delta\vartheta_{\text{к}} + T_{\text{в}}^{\text{от}} - \Delta\vartheta_{\text{и}} - T_{\text{ф}}^{\text{ср}}} \quad (5)$$

где $T_{\text{ф}}^{\text{ср}}$ – средняя температура рабочего теплоносителя контура грунтовых теплообменников, которые являются источником теплоты для грунтового испарителя ТН, К;

$\eta_{\text{к}}$ - КПД эквивалентного цикла Карно;

$\Delta\vartheta_{\text{к}}$ - разность температур в конденсаторе ТН, К;

$\Delta\vartheta_{\text{и}}$ – разность температур в испарителе;

$T_{\text{в}}^{\text{от}}$ - средняя температура теплоносителя в контуре потребителя теплоты, К.

Заключительным элементом КСТ является объект теплоснабжения ОТ.

Приведенная модель расчета тепловых потоков в КСТ позволяет решать задачу комплексного использования солнечного и грунтового нетрадиционных источников теплоты. При этом грунт используется в качестве аккумулятора теплоты.

Список литературы

1. Nievergeld P., Koppenol A.D. Experimental investigation about using the earth as a heat storage medium and as a heat source for the heat pumps. Report Eur 7414 EN. – Apeldoorn: Energy, TNO. – 1981. – P. 121-128.
2. Ball D., Fischer R., Hodgett D. Design methods for global source heat pumps // ASHRAE Transactions, DC-83-08. – 1983, № 4.
3. Амерханов Р.А., Ададулов Е.А., Денисова А.Е. Анализ систем теплоснабжения с комплексным использованием альтернативных источников энергии // Электромеханика. 2004. № 1. С. 61-63.
4. Денисова А.Е., Мазуренко А.С., Тодорцов Ю.К., Дубковский В.А. Использование энергии грунта в теплонасосных гелиосистемах энергоснабжения // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2000. - № 1, С. 27-31.
5. Денисова А.Е. Анализ тепловых явлений в грунте при работе теплонасосной грунтовой системы теплоснабжения // Холодильная техника и технология. - 2000. - №69.С. 75-78.
6. Ададулов Е.А., Амерханов Р.А. Моделирование грунтового аккумулятора теплоты.
7. Уделл С. Солнечная энергия и др. альтернативные источники энергии. Пер. со шведского. – М: Знание, 1980. – 88 с.
8. Рей Д., Макмайл Д. Тепловые насосы: Пер. с англ. М: Энергоатомиздат, 1988. – 224с.
9. Хайнрих Г., Найорк Х., Нестлер В. Теплонасосные установки для отопления и горячего водоснабжения: Пер. с нем. – М: Стройиздат, 1985. – 351 с.

УДК 697.34+662.997

Монах Светлана Игоревна,
к.т.н., доцент, доцент каф. ТТГВ;
Красникова Виктория Владимировна,
магистрант гр.ЗТГВм-55а,
ДОННАСА - филиал НИУ МГСУ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ГРУНТОВОМ АККУМУЛЯТОРЕ ТЕПЛОТЫ

В данной статье с целью получения математического аппарата для нахождения поля температур в объеме грунта вокруг грунтового аккумулятора теплоты разработана математическая модель нестационарного теплообмена в грунтовом аккумуляторе. Для теплообменных процессов в грунте, где основные теплофизические параметры существенно изменяются во времени и пространстве, установление зависимости между этими переменными величинами является довольно сложной задачей. Задачу предложено решить методами математической физики. Рассмотрен ограниченный пространственно-временной интервал, в котором выделяется элементарный объем, где происходят явления теплообмена. Поскольку процесс теплообмена в грунтовой системе имеет нестационарный характер, задачей моделирования становится определение особенностей изменения температурного поля в грунте на протяжении времени работы грунтового аккумулятора и решения уравнения нестационарной теплопроводности. Использование разработанной математической модели позволяет вести исследования тепловых процессов в грунтовом ТА при несравненно меньших затратах, чем при натурных испытаниях или при исследованиях на физической модели. Сформулированную задачу нестационарной теплопроводности рекомендуется решать численными методами.

Ключевые слова: математическое моделирование, поле температур, нестационарный теплообмен, грунтовой аккумулятор, метод математической физики, ограниченный пространственно-временной интервал, элементарный объем, нестационарная теплопроводность, тепловые процессы, численные методы

Для систем теплоснабжения, использующих возобновляемые источники энергии наибольший интерес в эксплуатационном и экономическом отношении представляют грунтовые аккумуляторы [1].

Известны несколько вариантов схем грунтовых теплообменников. Для индивидуального домостроения и сельскохозяйственных производств наибольший интерес представляют вертикальные грунтовые теплообменные аппараты коаксиального или U-образного типов (рисунок 1 а,б). Такие аппараты более технологичны в установке и занимают небольшие площади.

Распространение также получили вертикальные грунтовые теплообменники, имеющие вид концентрических, круглых трубок типа «трубок Фильда» (рис. 1 в). Концентрические трубки расположены «одна в одной». Теплоноситель поступает вниз по внутренней трубке, которая называется центральной, а вверх – по межтрубному каналу. Глубину заложения труб и их количество определяют в зависимости от тепловой мощности, необходимой потребителю. Систему аккумулялирования теплоты грунта, имеющую несколько грунтовых труб, называют грунтовой мультисистемой.

Природные подземные слои значительно отличаются своими структурными, теплофизическими и физико-механическими характеристиками. В зависимости от формы и размера частиц грунта подземные аккумуляторы можно разделить на 2 типа: гранулированные и блочные [1].

Грунт в гранулированных аккумуляторах состоит из частиц разной величины и формы. Между частицами имеет место множество пустот и расколов. В гранулированных аккумуляторах развита поверхность контакта теплоносителя с частицами, что повышает интенсивность теплообмена между теплоносителем и теплоаккумулирующим материалом [2].

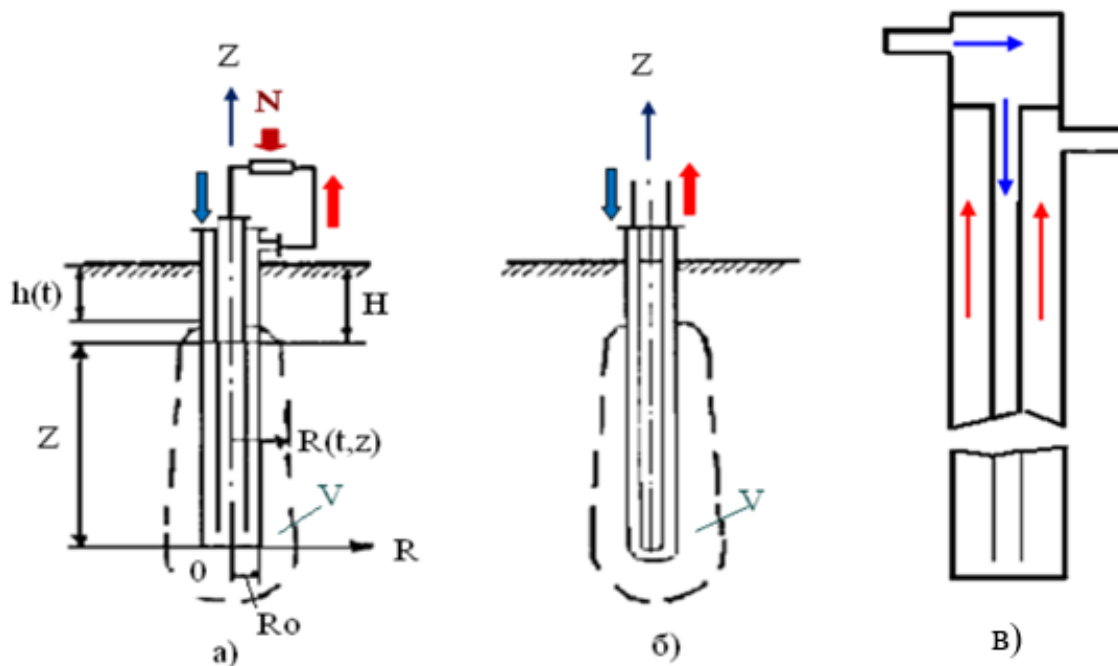


Рисунок 1 – Схемы коаксиального (а), U-образного (б) типов грунтовых теплообменников, схема геотермальной установки типа «трубка Фильда» (в)

Аккумуляторы блочного типа состоят из блоков горных пород и в этих аккумуляторах поверхность контакта теплоносителя с аккумулялирующим материалом грунта значительно хуже. Перемещение теплоносителя происходит в трещинах массива. Ширина трещин колеблется от нескольких миллиметров до 3 см [3].

Основным показателем условий фильтрации подземных аккумуляторов является коэффициент проницаемости.

Для гранулированных грунтов коэффициент проницаемости зависит от пористости почвы и определяется по формуле [4]

$$K = \frac{m^3}{5S_0^2(1-m)} \quad (1)$$

где m - пористость материала;

S_0 – поверхность частиц в единице объема породы $\text{м}^2/\text{м}^3$.

Различают полную пористость (объем всех пор) и эффективную пористость (объем соединенных пор). Для определения проницаемости грунтового аккумулятора представляет интерес эффективная пористость и для определения проницаемости аккумуляторов блочного типа можно воспользоваться формулой Е.С. Ромма [5].

$$K = 8,45 \cdot 10^6 (2\delta)^2 m \quad (2)$$

где 2δ - открытость трещин, мм.

Основными теплофизическими параметрами грунтовых аккумуляторов являются: теплопроводность, теплоемкость и температуропроводность.

Реальные грунты являются сложными, неупорядоченными и неоднородными структурами. Для описания структуры гранулированных проницаемых слоев на макроскопическом уровне следует использовать метод геометрического моделирования.

С целью упрощения задачи в качестве гранулированного грунтового аккумулятора примем слой постоянной мощности (с глубиной слоя $2h$) с регулярной укладкой сферических частиц одного размера a .

Процесс теплообмена при аккумулировании теплоты описывается системой нелинейных дифференциальных уравнения, которые содержат три переменные: давление, температуру теплоносителя и температуру твердого аккумулирующего материала.

Процессы теплообмена между теплоносителем и грунтом аккумулятора описываются следующими уравнениями [6].

$$\lambda_T(1-m)\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} - \alpha_T(t_T - t_P) = c_T \rho_T(1-m)\frac{\partial t_T}{\partial \tau} \quad (3)$$

$$\lambda_P m \frac{\partial^2 t_P}{\partial x^2} + c_P K \frac{\partial}{\partial x} \left[(A + B t_P) t_P \frac{\partial P}{\partial x} \right] + \alpha_T(t_T - t_P) = c_P m [C - D \cdot \exp(E t_P)] \frac{\partial t_P}{\partial \tau} \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[(A + B t_P) t_P \frac{\partial P}{\partial x} \right] = \frac{m D E}{K} \cdot \exp(E t_P) \frac{\partial t_P}{\partial \tau} \quad (5)$$

При начальных условиях $\tau = 0$, $\tau_K = \tau_T = \tau_0$;

$$\left. \frac{\partial t_T}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial t_T}{\partial x} \right|_{x=R} = 0 \quad (6)$$

$$t_P|_{x=0} = t_B; \quad \left. \frac{\partial t_T}{\partial x} \right|_{x=R} = 0 \quad (7)$$

$$\left. \frac{\partial P}{\partial x} \right|_{x=0} = S; \quad P|_{x=R} = P_e; \quad (8)$$

$$S = \frac{V[C - D \exp(E t_B)]}{K D}; \quad (9)$$

$$v = \begin{cases} A + B t_0, \tau = 0; \\ A_0 + B t_B, \tau > 0; \end{cases} \quad (10)$$

В вышеприведенных уравнениях приняты следующие обозначения:

λ_T – коэффициент теплопроводности грунта подземного аккумулятора, Вт/м·К;

λ_P – коэффициент теплопроводности теплоносителя, Вт/м·К;

m – пористость;

α_T – коэффициент теплообмена между теплоносителем и грунтом, Вт/м²·К;

t_T – температура грунта в зоне аккумулирования теплоты, °С;

t_P – температура теплоносителя, °С;

c_T – удельная теплоемкость грунта в зоне аккумулирования теплоты, кДЖ/кг·К;

c_P – удельная теплоемкость теплоносителя, кДЖ/кг·К;

ρ_T – плотность грунта в зоне аккумулирования, кг/м³;

τ – время, с;

K - проницаемость;

t_0 - начальная температура грунта, °C;

t_B - температура теплоносителя на входе в грунтовой аккумулятор, °C;

ν - коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

R - расстояние между нагнетательной и эксплуатационной скважинами аккумулятора, м;

V - скорость теплоносителя, м/с;

A, B, C, D, E – коэффициенты, указывающие на зависимость плотности ρ_p и кинетической вязкости теплоносителя ν_p от температуры.

При этом

$$\nu_p = \frac{1}{A+Bt}; \quad (11)$$

$$\rho_p = C - De^{Et}; \quad (12)$$

$$V = \frac{G}{BH} f(t) \quad (13)$$

Приведенная система уравнений может быть решена численными методами.

Однако для теплообменных процессов в грунте, где основные теплофизические параметры существенно изменяются во времени и пространстве, установление зависимости между этими переменными величинами является довольно сложной задачей [7-9].

Задачу можно решить методами математической физики. Рассматривается ограниченный пространственно-временной интервал, в котором выделяется элементарный объем, где происходят явления теплообмена.

Поскольку процесс теплообмена в грунтовой системе имеет нестационарный характер, задачей моделирования становится определение особенностей изменения температурного поля в грунте на протяжении времени работы грунтового аккумулятора и решения уравнения нестационарной теплопроводности [10].

Поскольку распределение температур в грунте в начальный момент времени $\tau_0 = 0$ зависит от глубины грунта Z , начальные граничные условия запишутся

$$T(r, Z, \tau) = T_0(Z) \quad (14)$$

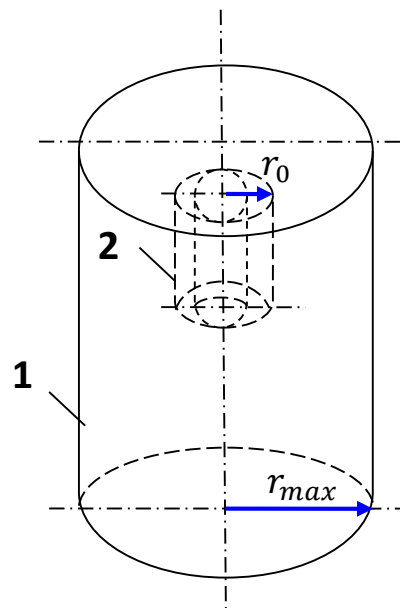
Для элементарного объема грунта 1, который ограничен цилиндрической поверхностью вокруг грунтовой трубки 2 приняты индексы обозначения температур на поверхности теплообмена с учетом геометрических характеристик среды, а именно:

Z_v, Z_n - глубина верхнего и нижнего торцов цилиндра;

r_{max} – внешний радиус цилиндра;

r_0 - внутренний радиус цилиндра на границе с грунтовой трубкой (рисунок 2).

Граничные условия, которые относятся к верхнему и нижнему торцам, цилиндрического объема грунта, отвечают граничным условиям I рода или задаче Дирихле, решение которой позволяет найти температуру внутри тела в произвольный момент времени по известному распределению температур на его поверхности.



1 – объем грунта, 2 – грунтовая трубка (ГТ)

Рисунок 2 – Элементарный объем грунта вокруг грунтовой трубки

Предположим, что нижний торец элементарного цилиндра, расположенного на глубине $Z = Z_n$, по отношению к распределению температур внутри выделенного цилиндрического объема на протяжении определенного времени будет изотермической поверхностью, т.е. на него не оказывает существенное влияние грунтовая трубка.

Тогда граничное условие I рода относительно нижней горизонтальной поверхности цилиндра при условии $0 \leq r \leq r_{max}$ приобретает вид

$$T(r, Z, \tau)|_{Z=Z_n} = T_n(t) \quad (15)$$

где $T_n(t)$ - температура нижнего торца грунта.

Верхний торец цилиндра, который находится на поверхности грунтового пласта, т.е. при $Z = Z_n$, также можно считать изотермической поверхностью и его температура примерно равна температуре окружающего воздуха.

Граничное условие I рода на верхней горизонтальной поверхности цилиндра при условии $0 \leq r \leq r_{max}$ запишется

$$T(r, Z, \tau)|_{Z=Z_B} = T_B(t) \quad (16)$$

На распределение температур вдоль вертикальной оси, вдоль внутренней боковой поверхности элементарного цилиндра, влияет грунтовая трубка, которая выполнена по типу трубки Фильда (рис. 1в). Внешняя и внутренняя теплообменные трубки расположены концентрично относительно одна другой и содержат внутри элементарный цилиндр симметрично оси.

Кроме того, теплоизолированную поверхность внутренней концентрической трубки можно считать адиабатической. Тогда в любой момент времени в каждой точке поверхности ГТ плотность теплового потока и производная температуры равняются нулю.

Граничное условие на боковой поверхности ГТ отвечает второй краевой задаче, или задаче Неймана, т.е. является в границах глубины $Z_{\text{в}} \leq Z \leq Z_{\text{н}}$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_0} = 0 \quad (17)$$

Граничное условие для внутренней боковой поверхности элементарного грунтового цилиндра на границе системы «теплоноситель - грунт» будет различным в зависимости от наличия или отсутствия отбора теплоты от грунта.

При наличии отбора теплоты от грунта, тепловой поток от грунта с температурой $T|_{r=r_0}$ передается теплоносителю, который циркулирует в ГТ, температура которого составляет T_f . По закону сохранения энергии поток теплоты, который подводится к системе теплопроводностью, равняется потоку теплоты, который отводится от системы конвекцией в окружающую среду при температуре T_f .

Теплообмен между поверхностью твердого тела и жидкостью описывается уравнением Ньютона-Рихмана, а теплообмен теплопроводностью на боковой поверхности грунта описывается уравнением Фурье [8].

Следовательно, при наличии отбора теплоты от грунта, для внутренней боковой поверхности элементарного объема грунта на границе с грунтовой трубкой, в которой движется теплоноситель будет иметь место граничное условие III рода. И для $Z_{\text{в}} \leq Z \leq Z_{\text{н}}$ граничное условие III рода запишется

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_0} = -\frac{\alpha}{\lambda} [T|_{r=r_0} - T_f], \quad (18)$$

где α - коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К;

λ - коэффициент теплопроводности, Вт/м·К.

При отсутствии отбора грунтовой теплоты, т.е. если циркуляция теплоносителя в трубках ГТ отсутствует, внутреннюю боковую поверхность элементарного объема грунта на границе «теплоноситель - грунт» можно считать адиабатической, а тепловой поток, отводимый от указанной поверхности равен нулю.

Непосредственно у грунтовой теплообменной трубки процесс теплообмена наиболее интенсивен, тем не менее, с увеличением расстояния от ГТ вдоль радиуса r элементарного цилиндра вокруг грунтовой трубки интенсивность теплообмена уменьшается.

Представим элементарный шаг dx вдоль радиуса элементарного цилиндра вокруг грунтовой трубки (при $r > 0$), совпадающий с направлением оси x в логарифмических координатах

$$x = \ln r \quad (19)$$

Тогда

$$dx = \frac{dr}{r} \quad (20)$$

Если координату r_0 на внутренней поверхности элементарного цилиндра заменить координатой x_0 , а координату r_{max} на внешней его поверхности заменить координатой x_{max} , с учетом выражения (20) получим

$$x_{\text{max}} - x_0 = \int_{r_0}^{r_{\text{max}}} \frac{dr}{r} = \ln \left(\frac{r_{\text{max}}}{r_0} \right) \quad (21)$$

Используя соотношения (19) и (21), после преобразований, получим новое дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности в грунте при условии, что $x_0 \leq x \leq x_{max}$

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial \tau} &= a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \\ &= \frac{a}{r^2} \left(r^2 \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \\ &= \frac{a}{r^2} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} - \frac{\partial T}{\partial r} \right] + a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \\ &= \frac{a}{r^2} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial T}{\partial x} \right) + a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \frac{a}{r^2} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)\end{aligned}\quad (22)$$

Полученное уравнение (22) можно использовать для нахождения поля температур в элементарном объеме грунта вокруг ГТ, используя численные методы.

Необходимо уточнить, что при использовании логарифмических координат запись граничного условия II рода (уравнение (17)) несколько изменится. Граничные условия II рода на внешней вертикальной боковой поверхности элементарного цилиндра для глубины $Z_b \leq Z \leq Z_n$ и с учетом уравнения (21) будут иметь вид

$$\left. \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=x_{max}} = 0 \quad (23)$$

А граничные условия I рода, сформулированные уравнениями (14-16) не изменятся.

Уравнение (22) совместно с граничными условиями являются математической моделью процессов нестационарной теплопроводности в грунтовом аккумуляторе теплоты.

Использование разработанной математической модели позволяет вести исследования тепловых процессов в грунтовом ТА при несравненно меньших затратах, чем при натурных испытаниях или при исследованиях на физической модели. Сформулированную задачу нестационарной теплопроводности рекомендуется решать численными методами [9-10].

Список литературы

1. Ададунов Е.А., Амерханов Р.А. Моделирование процесса аккумуляции теплоты в массиве грунта // Изв. вузов Сев.-Кавк. регион. Естественные науки. Приложение. 2004. №8. С. 60-65.
2. Ададунов Е.А. Аккумулятор с дискретным источником теплоты // Электромеханические преобразователи Энергии; Материалы третьей межвузовской научной конференции; Краснодар, КубГАу, 8 – 9 апреля 2004. С. 83 – 86.
3. Рац М.В., Черышев С.Н. Трещеноватость и свойства трещеноватых горных пород. – М: Наука, 1970. – 158 с.
4. Шейдоггер А.Э. Физика течения жидкости через пористые среды. – М: Гостоптехиздат, - 1960. – 250 с.
5. Ромм Е.С. Фильтрационные свойства трещиноватых горных пород. – М: Недра, 1966. – 283 с.

6. Ададуров Е.А. Повышение эффективности использования аккумуляторов теплоты с возобновляемыми источниками энергии [Электронный ресурс] Дис. ...канд.техн.наук: 05.12.08. – М: РГБ 2005.
7. Тепло- и массообменные аппараты и установки промышленных предприятий. Ч.2 / Под ред. Б.А. Левченко. – Харьков: ХДПУ, 2000. – 334 с.
8. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М: Высшая школа. 1967. – 599 с.
9. Рихтмайер Р., Мортон К. Разностные методы решения краевых задач. –М: Мир, 1972. –420 с.
10. Коздоба Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. –М: Наука. 1975. – 228 с.

УДК 697.1: 535.1

Монах Светлана Игоревна,
к.т.н., доцент, доцент каф. ТТГВ;
Шацков Роман Олегович,
аспирант каф. ТТГВ;
Рель Юлия Константиновна,
магистрант гр.ЗТГВм-55а,
ДОННАСА - филиал НИУ МГСУ

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО КОМФОРТА И РАБОТЫ СИСТЕМ РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНОГО ОТОПЛЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ БОЛЬШОГО ОБЪЕМА

В данной статье с целью обоснования целесообразности применения радиационно-конвективного отопления в производственных помещениях большого объема проведен анализ научно-исследовательской, нормативной и технической литературы, который показал, что на производственных объектах для обеспечения условий теплового комфорта производственного персонала целесообразно применять газовые инфракрасные излучатели и, при этом необходимо обеспечить допустимый уровень теплового излучения. Также обосновано, что для учета варьируемых условий работы производственных объектов, размещения крупногабаритного технологического оборудования, возможности возникновения неоднородных температурных полей необходимо учитывать конвективный теплообмен внутри помещений. Существующие радиационно-конвективные системы отопления на основе газовых инфракрасных излучателей, как показывают проведенные аналитические исследования, требуют совершенствования в отношении определения режима работы излучателей.

Ключевые слова: производственные помещения большого объема, обеспечение условий теплового комфорта, газовые инфракрасные излучатели, уровень теплового излучения, конвективный теплообмен, радиационный теплообмен, режим работы излучателей.

Главной задачей при проектировании систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха является создание условий для комфортного пребывания производственного персонала в помещении при наименьших затратах энергоресурсов.

К показателям, характеризующим условия теплового комфорта в помещениях, относятся: температура воздуха; температура ограждающих поверхностей; относительная влажность воздуха; скорость движения воздуха; интенсивность теплового облучения [1]. Таким образом, основной задачей создания теплового комфорта является обеспечение соответствия фактических значений указанных параметров воздуха требуемым, для поддержания нормальных условий пребывания людей в производственном помещении.

В общем случае, необходимо отметить, что на тепловой комфорт влияют следующие факторы:

- температура воздуха t_v , °C;
- температура ограждающих поверхностей - t_s , °C;
- скорость перемещения воздуха в помещении - v (м/с);
- тепловое сопротивление одежды – R_o ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$)
- уровень активности человека - Q (Вт);
- относительная влажность среды - ϕ (%).

Температура воздуха в помещении является первичным критерием оценки теплового состояния отапливаемого помещения, который, с учетом скорости перемещения воздуха, определяет конвективную передачу теплового потока от человека к окружающему пространству.

Отопление должно обеспечить, при скорости движения воздуха $v \leq 0,1$ м/с, средней температуре окружающего воздуха $t_{\text{в}} = 18 - 20$ °С и относительной влажности среды $\phi = 30 - 70$ %, такое вертикальное распределение воздуха в помещении, при котором температура на уровне высоты головы человека (в рабочей зоне - приблизительно 1,7 м над полом) была бы примерно на 2 °С ниже, чем на уровне 10 см над полом. При этом разница температур стен и пола, и температуры воздуха должна составлять не более 7 °С, если человек находится в состоянии покоя, и не более 10 °С, если он активно двигается.

Среднее арифметическое эффективной температуры стен и температуры воздуха в помещении ($t_{\text{п}}$) называют внутренней температурой в помещении, которая измеряется в геометрическом центре помещения на высоте 1 м от пола, что соответствует центру тяжести стоящего человека.

Остальные условия теплового комфорта в помещении принадлежат к более широкому набору микроклиматических факторов, напрямую не связанных с функциями систем отопления:

- наличие частиц пыли в воздухе;
- наличие микроорганизмов или бактерий;
- наличие газов, испарений и запахов разного типа;
- содержание ионов в воздухе.

Для обеспечения условий теплового комфорта в здании (сооружении) выполняют расчет потребления тепла и тепловой характеристики зданий с учетом:

- тепловых потерь, регламентированных нормативными документами для температуры воздуха внешней среды в зависимости от климатического района и материалов ограждающих конструкций;
- характеристик смежных строений объекта.

Одним из источников тепловой энергии, наиболее рационально обеспечивающих тепловой комфорт в помещении большого объема, является инфракрасное излучение, которое генерируется любым нагретым телом с определенной интенсивностью и спектром излучаемой электромагнитной энергии. Количественной характеристикой инфракрасного излучения является *интенсивность теплового излучения* - энергия, излучаемая с единицы площади в единицу времени (Вт/м^2) [2]. В зависимости от длины волны изменяется проникающая способность инфракрасного излучения. Наибольшую проникающую способность имеет коротковолновое инфракрасное излучение ($0,76 \div 1,4$ мкм), которое проникает в ткани человека на глубину в несколько сантиметров. Инфракрасные лучи длинноволнового диапазона ($9 \div 420$ мкм) задерживаются в поверхностных слоях кожи.

В настоящее время действует государственный стандарт ГОСТ 12.1.005- 88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» [3], в котором нормируется интенсивность теплового облучения работающих от нагретых поверхностей технологического оборудования, осветительных приборов, инсоляции на постоянных и непостоянных рабочих местах, которая не должна превышать 35 Вт/м^2 при облучении 50 % поверхности тела и более, 70 Вт/м^2 - при величине облучаемой поверхности от 25 до 50 % и 100 Вт/м^2 - при облучении не более 25 % поверхности тела.

Интенсивность теплового облучения работающих от открытых источников (нагретый металл, стекло, открытое пламя и др.) не должна превышать 140 Вт/м^2 , при этом облучению не должно подвергаться более 25 % поверхности тела и обязательным является использование средств индивидуальной защиты, в том числе средств защиты лица и глаз [4].

Несмотря на знание гигиенических и биологических особенностей воздействия инфракрасного излучения, в отечественной и зарубежной научно- технической литературе практически отсутствуют систематизированные данные, характеризующие системы отопления и обогрева с газовыми инфракрасными излучателями, с точки зрения теплотехники и гигиены. Для этих систем целесообразно проведение натурных исследований, так как при этом могут более отчетливо проявиться их достоинства и недостатки, определиться

оптимальные параметры микроклимата, уточнить методики расчета этих систем, а также могут быть внесены коррективы в нормативные требования.

Учитывая то обстоятельство, что тепловые ощущения зависят не только от температуры воздуха, одним из способов повышения теплового комфорта в помещении становится увеличение доли лучистого тепла, отдаваемого нагревательными приборами. Необходимо также учитывать тот факт, что теплообмен между телом человека и окружающей его средой происходит одновременно несколькими способами: излучением, конвекцией и испарением, поэтому он не может зависеть только от температуры воздуха.

Изучение явлений теплообмена привело к понятию о результирующей температуре, служащей критерием тепловых ощущений в окружающей среде, с учетом всех переменных условий, характеризующих среду, физиологическое состояние человека и защитные свойства его одежды.

Теплоотдача телом человека зависит, при определенном характере его деятельности и одежды, от следующих факторов:

- 1) от температуры ограждающих конструкций t_s ,
- 2) от температуры воздуха t_v ;
- 3) от степени влажности e ;
- 4) от скорости движения воздуха v .

Критерием тепловых ощущений является результирующая температура i_r , создающая такое же тепловое ощущение, как когда температура ограждений равна температуре воздуха, а воздух неподвижен и обладает 100 % - ной относительной влажностью.

Результирующую температуру в неявном виде можно выразить формулой

$$t_R = f(t_s, t_v, e, v) \quad (1)$$

Отопление высоких с большими объемами промышленных помещений усложняется тем, что нагретый воздух поднимается вверх, создавая мощные конвективные потоки, а нижняя рабочая зона, где находятся люди и требуется больше тепла, нагревается меньше. Это приводит к тому, что помещения начинают обогреваться воздухом сверху вниз. Крыши помещений, как правило, имеют наихудшие теплоизоляционные показатели, которые еще больше снижаются аэрационными фонарями, что приводит к увеличению тепловых потерь через кровлю и верхний пояс стен по периметру здания. Экспериментальные измерения показывают, что под крышей температура достигает 25-35 °С, в то время как на полу температурный комфорт практически отсутствует. Иначе говоря, при наружной температуре от -5÷-15 °С результирующая температура воздуха в зоне пребывания человека составляет от 0÷10 °С. Инфракрасные излучатели позволяют избежать подобного нерационального распределения температуры независимо от высоты помещения, поскольку нагревают не воздух, а передают тепло поверхностям предметов.

Параметры микроклимата на обогреваемых рабочих местах в не отапливаемых помещениях производственных и складских зданий, на открытых и полукрытых площадках должны соответствовать значениям, установленным в приложении 3 СанПиН 2.2.4.548-96 с учетом времени пребывания производственного персонала на рабочих местах. Параметры микроклимата в помещениях отапливаемых общественных зданий, оборудованных системами отопления с газовыми инфракрасными излучателями (ГИИ) (температура воздуха, скорость движения воздуха, относительная влажность воздуха, результирующая температура помещения и локальная асимметрия результирующей температуры), должны соответствовать значениям, приведенным в таблице 2 ГОСТ 30494-96 [4]. При этом допускается снижение температуры воздуха, но не более чем на 2 °С по сравнению со значениями, предусмотренными ГОСТ 30494-96.

Для предупреждения неблагоприятного воздействия инфракрасного излучения на организм человека интенсивность теплового облучения при отоплении и обогреве должна

быть не выше:

- 15 Вт/м² на поверхности незащищенных участков головы при температуре воздуха, соответствующей нижней границе допустимых величин;
- 25 Вт/м² на поверхности туловища, рук и ног человека при температуре воздуха, соответствующей нижней границе оптимальных величин;
- 50 Вт/м² на поверхности туловища, рук и ног человека при температуре воздуха, соответствующей нижней границе допустимых величин указанных в СанПиН 2.2.4.548-96 [1].

При понижении температуры воздуха, начиная от нижней границы соответствующих нормативных величин, приведенных в СанПиН 2.2.4.548-96, интенсивность теплового облучения должна увеличиваться:

- на 15 Вт/м² на поверхности незащищенных участков головы на каждый градус снижения температуры;
- на 25 Вт/м² на поверхности туловища, рук и ног на каждый градус снижения температуры.

При этом максимальная интенсивность инфракрасного облучения поверхности туловища, рук и ног не должна превышать 150 Вт/м² на постоянных и 250 Вт/м² на непостоянных рабочих местах.

Контроль параметров микроклимата на соответствие требованиям, приведенным выше, следует осуществлять согласно СанПиН 2.2.4.548-96 и ГОСТ 30494-96. При этом интенсивность теплового облучения следует измерять в горизонтальных и вертикальных плоскостях на уровне головы, туловища и ног работающих.

Газовые инфракрасные излучатели должны размещаться таким образом, чтобы не создавать прямого воздействия инфракрасного излучения на глаза человека в секторе рабочего обзора.

При применении ГИИ нет избыточного нагрева воздуха, происходит выравнивание температуры между полом и потолком, что позволяет экономить энергоресурсы. Конвективное отопление рациональнее применять для отопления низких, небольших и хорошо изолированных помещений (рисунок 1). Действие излучателей является безынерционным, нет необходимости вырабатывать энергию для нагрева воздуха, который затем нагревает помещение.

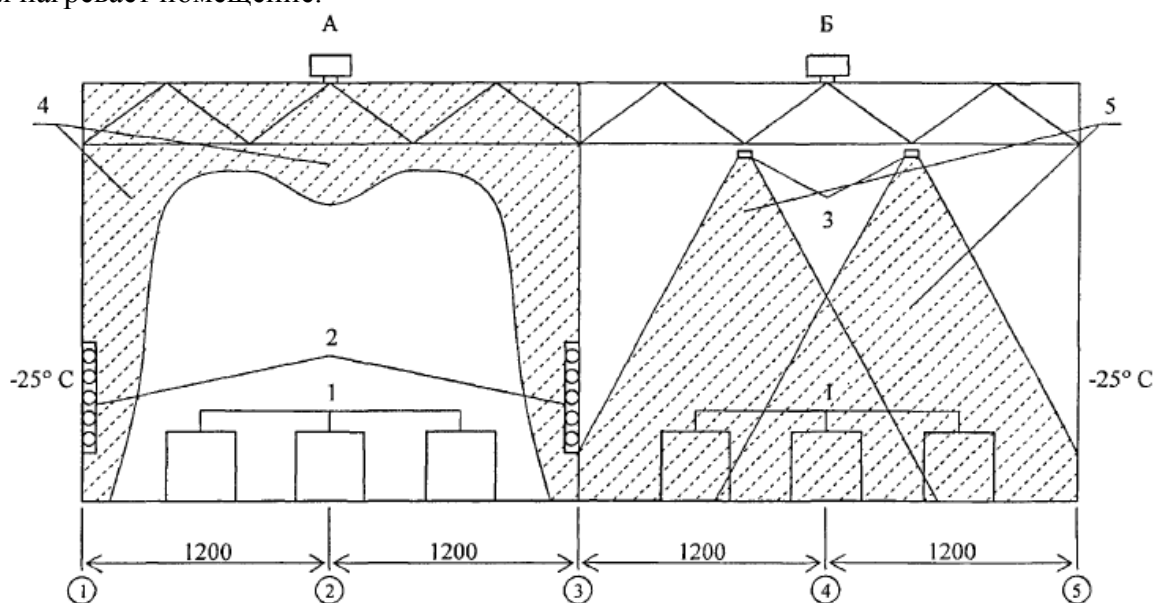


Рисунок 1 - Принципиальные схемы отопления помещений.

А - помещение с системой конвективного отопления, Б - помещение с системой отопления на основе газовых инфракрасных излучателей: 1 - технологическое оборудование; 2 - регистры; 3 - газовые инфракрасные излучатели; 4 - тепловая пробка; 5 - инфракрасное излучение

Инфракрасное излучение распространяется прямолинейно, преломляется, отражается и поляризуется, также как видимый свет, что на практике означает возможность отопления заранее определенных зон и частей помещений. Температура, которую ощущает человек в зоне работы инфракрасного излучателя, это среднеарифметическая температура между температурой теплового инфракрасного потока и температурой воздуха. Правильное использование преимуществ зонального нагрева, без прогрева неиспользуемых площадей всего помещения, позволяет экономить до 80 % энергии. С такой задачей не может справиться ни одна из традиционных систем нагрева по причине моментальной инфильтрации теплого воздушного потока в холодном окружающем воздухе. Многие страны с начала 60-х годов прошлого века начали широко внедрять на производстве системы отопления на основе ГИИ.

В России первые системы радиационно-конвективного отопления на основе ГИИ появились в 1962 году, но широкого распространения не получили по причине низкого уровня газификации и всецело доминирующей идеологии максимально возможной централизации тепловых сетей.

Преимущества при применении газовых инфракрасных излучателей:

- в ГИИ газ сгорает в зоне прогрева, прямо превращаясь в тепловую энергию, следовательно, отсутствуют потери в теплообменниках и теплотрассах;
- газовые инфракрасные излучатели устанавливаются в помещениях на высоте не менее 3,5 метров, в свободном пространстве, имеют небольшие габариты, не загромождают стены радиаторами, регистрами, вентиляционными коробами, тепловыми завесами;
- системы отопления с применением ГИИ не требуют строительства котельных, теплотрасс, дымовых труб и тем самым исключаются затраты на их строительство и содержание;
- для отопления помещений требуется мощность в несколько раз меньшая, чем при системе воздушного отопления и на порядок меньшая, чем при водяном;
- при использовании газовых инфракрасных излучателей возможно понижение температуры в помещении на $2\div 4$ °C без снижения комфортности, и экономия тепла только при этом достигает 15 %;
- современная электроника, управляя работой системы отопления на основе ГИИ в импульсном режиме, поддерживает температуру на постоянном уровне за счет тепловой инерции поверхности нагрева. Точная регулировка позволяет избегать выделения избыточной мощности и создает дополнительные предпосылки к экономии затрат;
- системы отопления с ГИИ не требуют присутствия оператора, работают в автоматическом режиме по заданной программе на сутки, неделю и т.д.;
- универсальность применения - производственные цеха, мастерские, склады, гаражи и т.д.;
- помещения многоцелевого назначения, вестибюли, залы ожидания, спортивные сооружения, бассейны и т.д.;

ГИИ совместимы с любыми системами вентиляции, т.к. их работа не приводит к циркуляции потоков воздуха, способных повлиять на функционирование вентиляционных систем.

При радиационно-конвективном отоплении с использованием ГИИ характерная особенность кривых температур воздуха по вертикали заключается в изгибе в сторону повышения ее у пола. При конвективных системах отопления также наблюдается изгиб кривых температуры воздуха у пола, но в сторону понижения температуры. Указанное обстоятельство свидетельствует о гигиеническом преимуществе систем радиационно-конвективного отопления (теплый пол).

Исследования изменения температуры воздуха показали более равномерное распределение ее по горизонтальным зонам при использовании данной системы отопления. Колебания температуры воздуха по высоте рабочей зоны не превышают 2,3 °C, а на уровне головы человека (1,7 м) 1,2 °C, при средней температуре воздуха $8\div 18$ °C [5].

Исследования показали, что при конвективном отоплении температурный градиент по высоте составляет $1,7 \div 2,5$ °С/м. При этом разница температур у пола и потолка может достигать $6 \div 10$ °С. При отоплении ГИИ температура у поверхности пола выше, чем у потолка, температурный градиент составляет $0,3$ °С/м, причем, комфортная температура на высоте $1,5$ м может быть понижена на $2 \div 4$ °С, без ущерба для комфортности [6, 7].

За счет снижения затрат на отопление потолочной части, верхнего пояса стен по периметру здания и снижения комфортной температуры инфракрасное отопление для помещений большого объема экономичнее конвективного.

Различные исследования, выполненные путем наблюдения над большим числом людей, показали, что тепловые ощущения зависят для нормального человека в одинаковой мере как от средневзвешенной температуры ограждающих конструкций, «видимых» из центра его тела, так и от температуры воздуха [5, 8, 7, 9].

$$t_{R.B} = \frac{t_S + t_B}{2} \quad (2)$$

где t_S - средневзвешенная температура ограждений, «видимых» из центра тела человека, °С;
 t_B – температура воздуха, °С.

Это означает, что в помещении с температурой ограждений равной t_S , и температурой воздуха t_B возникают такие же тепловые ощущения, как в помещении, где температура ограждений и воздуха одинакова и равна $t_{R.B}$ (рисунок 2). В помещении, температура ограждающих конструкций которого равна 20 °С, а температура воздуха 16 °С, тепловые ощущения будут такими же, как в помещении, где температура ограждений 21 °С, а температура воздуха 15 °С, поскольку сумма $t_S + t_B$ в обоих случаях равна 36 °С. Очевидно, такие тепловые ощущения будут в помещении, в котором и температура ограждений, и температура воздуха равны 18 °С.

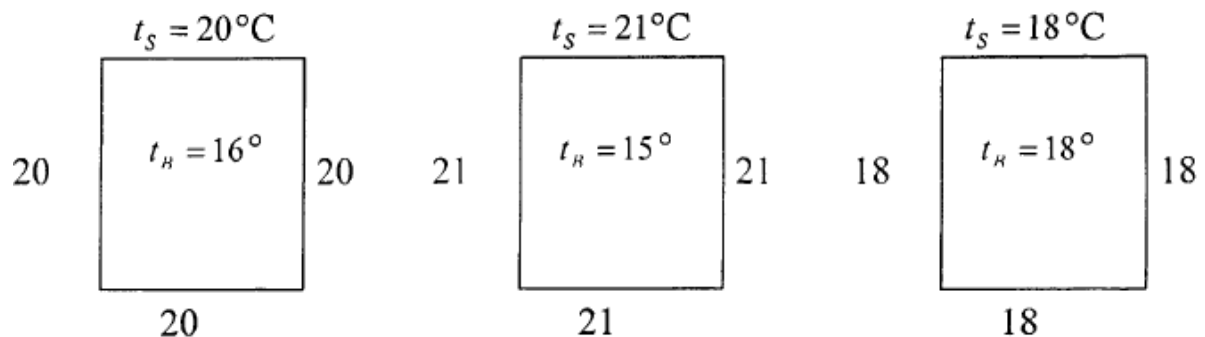


Рисунок 2 – Помещения, в которых тепловые ощущения, определяемые величиной $t_{R.B} = \frac{t_S + t_B}{2}$ одинаковы

При конвективном отоплении, например, посредством радиаторов или регистров, средневзвешенная температура ограждений всегда ниже температуры воздуха, так как ограждения обогреваются в основном этим же воздухом. Из этого следует, что для достижения результирующей температуры, равной, например, 18 °С, необходимо, чтобы температура воздуха была немного более высокой, порядка $19 \div 21$ °С и даже выше, в зависимости от температуры наружного воздуха и от отношения площади остекленных поверхностей к общей площади ограждений.

При отоплении с использованием ГИИ, наоборот, стремятся нагревать некоторые ограждения помещения. При этом средневзвешенная температура ограждений, «видимых» с определенной точки помещения, может быть либо выше, либо ниже температуры воздуха, в зависимости от положения этой точки и от площади и температуры излучающих

поверхностей. Из этого следует, что при одинаковой результирующей температуре, т.е. при одинаковых комфортных условиях, человек может дышать при радиационно-конвективном отоплении более холодным воздухом, чем при конвективном. Это и является одним из основных преимуществ систем отопления на основе ГИИ.

Таким образом, можно выделить следующие основные преимущества систем отопления на основе ГИИ, позволяющие снизить затраты при обеспечении оптимальных условий теплового комфорта в помещениях:

- не требуют теплотрасс, не имеют проблем размораживания;
- отсутствуют потери в теплообменниках и теплотрассах;
- не требуют дополнительных площадей;
- имеют возможность работы в автоматическом режиме с помощью компьютерной системы управления;
- обеспечивают возможность мониторинга работы системы отопления;
- обеспечивают возможность зонального и сменного отопления;
- быстро прогревают помещение и поддерживают оптимальную температуру в зоне пребывания производственного персонала;
- обеспечивают возможность снижения температуры в помещении без потери ощущения комфорта.

При отоплении инфракрасными излучателями используется существующий в природе принцип солнечного излучения. Инфракрасное излучение инфракрасных приборов практически полностью соответствует тепловому излучению солнца. Общая экономия энергии при использовании газовых систем лучистого отопления может достигать 70 % [5]. При существующем уровне цен затраты на отопление снижаются в 5-10 раз. В тоже время, создание комфортных условий при радиационно-конвективном отоплении в высоких помещениях с

Одним из направлений создания современных отопительных систем являются системы инфракрасного обогрева, в которых роль нагревательных устройств выполняют инфракрасные излучатели, в качестве отопительных приборов выступают оборудование и ограждающие конструкции зданий и сооружений, кроме того, системы транспортировки (магистральные и местные трубопроводы, насосы для перекачки теплоносителя) отсутствуют и их роль играют электромагнитные волны, распространяющиеся в окружающей среде.

В классической теплотехнической литературе рассматриваются, в основном, конвективные системы отопления, иногда в отдельную категорию выделяют огневоздушные системы.

Конвективные системы отопления в качестве основного используют процесс переноса теплоты конвекцией поверхностям отопительных приборов при движении и перемешивании достаточно больших объемов вещества. Особенностью данных систем является то, что от отопительных приборов прогревается весь воздух, вне зависимости от объема и высоты здания, расположения в нем производственного персонала.

В огневоздушных системах отопления (печи, каменки) нагрев теплоносителя - воздуха осуществляется с помощью огня.

Системы, использующие инфракрасные излучатели, в современной литературе относят к лучистым, радиационным или инфракрасным. Определяющей, в данном случае, является радиационная система отопления, в ней обогрев помещений осуществляется преобразованием энергии электромагнитного излучения инфракрасного спектра в тепло после попадания излучения на поверхность предметов, которые данную энергию поглощают, нагреваются и прогревают окружающий воздух.

В то же время, практически все существующие отопительные приборы в процессе работы нагреваются, и, часть тепловой энергии передают при помощи инфракрасного излучения. В последние годы также принята классификация отопительных систем по принципу действия отопительных приборов, которые, в зависимости от количества передаваемого излучением тепла, подразделяют на радиационные, радиационно-

конвективные и конвективные.

К радиационным приборам, передающим излучением более 50 % общего теплового потока, относят светлые газовые инфракрасные излучатели, пленочные лучистые электронагреватели, отопительные панели, металлические или бетонные, расположенные в подпотолочной зоне или в плоскости наружных и внутренних стен. К радиационному виду отопления также относят и отопительную систему "теплый пол".

К радиационно-конвективным приборам, передающим конвекцией 25-50 % общего теплового потока, относят темные газовые инфракрасные излучатели, радиаторы - секционные и панельные, гладкотрубные.

К конвективным приборам, передающим конвекцией не менее 75 % общего теплового потока, относят конвекторы, ребристые трубы и воздухонагреватели (калориферы), применяемые для нагревания воздуха в системах воздушного отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха.

Область исследования, проводимого в данной работе, ограничена применением систем отопления высоких помещений большого объема: производственных цехов, автосалонов и автосервисов, складов, магазинов, спортзалов, теплиц и т.д. Системы отопления в данных помещениях обладают рядом особенностей, обуславливающих преимущества радиационного (инфракрасного, лучистого) отопления.

Во-первых, при конвективном отоплении теплый воздух естественным образом оказывается вверху, создавая мощные конвективные потоки, перемешивающие пыль в помещении, а холодный - внизу, при этом температурный градиент по высоте составляет $1,7 \div 2,5$ °C/м, что приводит к неэффективному расходу тепловой энергии на прогрев больших объемов воздуха подпотолочного пространства, в котором нет необходимости создавать условия теплового комфорта. Чем больше высота помещения, тем большую экономию потребления энергии дает применение инфракрасного обогрева.

Во-вторых, инфракрасный обогрев позволяет осуществлять локальный обогрев рабочего места или зоны в помещении. При этом нет необходимости в постоянном или предварительном нагреве рабочих помещений, есть возможность снижения температуры во время перерывов в работе персонала. Лучистое тепло создает ощущение, что температура окружающего воздуха несколько выше (на $2 \div 3$ °C), чем есть на самом деле, что позволяет человеку чувствовать себя комфортно при более низкой температуре. Повышенная температура ограждений уменьшает их «холодное излучение» и повышает комфортность.

В современных исследованиях радиационное (лучистое) отопление классифицируют, исходя из используемого типа излучателей:

- темные излучатели в соответствии с DIN 3372, часть 6 [97], без открытого пламени с температурой поверхности, не превышающей 450 °C;
- светлые излучатели в соответствии с DIN 3372, часть 1 [96], с температурой поверхности до 900 °C.

Необходимо отметить, что «только светлые излучатели в полной мере реализуют лучистый теплообмен, интенсивность которого в соответствии с законом Стефана-Больцмана пропорциональна четвертой степени разности температур обменивающихся теплом поверхностей. В случае темных излучателей, использующих длину волны излучения порядка 10 мкм, наряду с лучистой составляющей существенным является конвективный теплообмен, что, с одной стороны, позволяет в определенной мере избежать недостатков, характерных для лучистого отопления, а, с другой стороны, приводит к ухудшению условий обогрева, свойственных размещению нагревателей конвективного типа под потолком» [15].

При этом характерной особенностью светлых излучателей является то, что созданию высоких температур сопутствует выгорание кислорода, а также образование вредных веществ за счет пригорания пыли. Поэтому необходимо обеспечить приток определенного количества свежего воздуха. По рекомендациям DVGW G 638 [99], на каждый кВт мощности, развиваемой светлыми излучателями, необходимо гарантированное снабжение не менее 30 м³/ч свежего воздуха. Данное требование приводит к тому, что в результате возникает

достаточно существенное движение воздушных масс в помещениях, отапливаемых светлыми излучателями, что приводит к возникновению конвективных процессов. Следовательно, систему отопления, использующую светлые излучатели, следует считать радиационно-конвективной.

Одним из преимуществ лучистого отопления является возможность поддержания более низких температур воздуха внутри помещения при создании аналогичных условий тепловых ощущений, что и при использовании воздушного отопления. Сказанное обстоятельство рассматривается как фактор энергосбережения, поскольку при этом несколько снижается количество тепла, потребного для подогрева приточного воздуха. Действительно, лучистое отопление характеризуется следующими основными показателями:

- Средняя радиационная температура t_R , равная температуре поверхности абсолютно черного тела, с которым происходил бы лучистый теплообмен, эквивалентный имеющему место в реальной обстановке;
- Температура воздуха внутри помещения t_B ;
- Оперативная температура t_0 , равная температуре поверхности абсолютно черного тела, с которым происходил бы в сумме лучистый и конвективный теплообмен, эквивалентный имеющим место в реальной обстановке;
- Эффективный лучистый поток ERF , воздействующий на человека.

Принимая во внимание коэффициенты лучистого α_L и конвективного α_K теплообмена, справедливо соотношение между перечисленными выше основными показателями

$$ERF = (\alpha_L + \alpha_K) \cdot (t_0 - t_B) \quad (3)$$

Т.е. с увеличением радиационного фактора происходит рост температуры поверхности ограждающих конструкций, что обуславливает рост потерь тепла за счет их теплопроводности, что также необходимо учитывать при проектировании радиационно-конвективных систем.

Особенностью применения радиационно-конвективных систем отопления является то, что лучистое отопление характеризуется быстрым разогревом помещения в сравнении с традиционной системой отопления конвективного типа, т.е. обладают большей инерционностью, что особенно важно для производственных высоких помещений большого объема в двух аспектах:

- для поддержания заданных температурных режимов при варьируемых условиях работы (открывающиеся ворота, переменные технологические процессы, транспортные операции);
- при переходе из дежурного в рабочий режим, например, в начале смены после ночного снижения температуры до минимально допустимого уровня.

Для больших производственных помещений с громоздким оборудованием и резко варьируемыми температурными условиями при использовании радиационного (лучистого) отопления характерна неоднородность формируемых температурных полей, возникновение зон затенения, что также приводит к существенному движению воздушных масс и конвективным процессам внутри помещений. Подход к проектированию таких систем, как радиационно - конвективные, позволяет учесть эти особенности и подобрать наиболее эффективные режимы работы инфракрасных излучателей.

КПД светлых и темных излучателей примерно одинаков и составляет порядка 90-95 %. Высокий уровень КПД обусловлен прямым превращением энергии газового топлива в тепловую энергию.

Стандартный комплект системы инфракрасного обогрева включает:

- набор газовых инфракрасных обогревателей;
- микропроцессорную систему управления и контроля;

- локальный пульт управления и мониторинга;
- датчики температуры, пожарные датчики;
- детекторы CO, NO, утечки газа и др.

Для повышения эффективности управления системой, стандартный комплект может быть дополнен:

- дистанционным центральным диспетчерским пультом управления и мониторинга;
- дестратификатором;
- газовыми воздухонагревателями;
- газовыми воздушными завесами.

Таким образом, в полной комплектации система включает в себя такие элементы, как датчики контроля качества окружающей среды и безопасности, устройства дестратификации и рекуперации, система мониторинга и оптимизации.

С явлением лучистого теплообмена специалисты по инженерному оборудованию зданий встречаются часто, и в их задачу входит конструирование различных технических установок на основе соответствующих закономерностей. Такой задачей, наряду с прочим, является и расчет радиационно-конвективного отопления, при этом принимаются во внимание хорошо известные основные законы излучения, используемые в инженерной практике. Известно, что тепловое излучение, представляет собой одну из форм электромагнитного излучения.

Электромагнитные волны это, как известно, процесс распространения электромагнитного поля в пространстве. Электромагнитная волна представляет собой процесс последовательного, взаимосвязанного изменения векторов напряженности электрического и магнитного полей, направленных перпендикулярно лучу распространения волны, при котором изменение электрического поля вызывает изменения магнитного поля, которые, в свою очередь, вызывают изменения электрического поля. Скорость распространения электромагнитных волн в изотропном пространстве может быть определена по теории Максвелла: что, скорость распространения электромагнитного поля в вакууме равна скорости света $c = 3 \times 10^8 \frac{м}{с}$, а в воздушной среде эта скорость v меньше и зависит от свойств среды [10]

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}} \quad (4)$$

где ϵ - диэлектрическая проницаемость среды;

μ - магнитная проницаемость среды.

Следует заметить, что эта скорость, в отличие, например, от скорости волн в воде или скорости звуковых волн не зависит от частоты. Практически можно возбуждать и наблюдать электромагнитные волны с любой длиной волны.

С точки зрения формирования электромагнитной волны очень важно то, что излучение создает ускоряющийся заряд, и энергия образующегося магнитного поля расходуется на ускорение заряда.

Т.к. тепловое излучение возникает за счет того, что атомы тела под действием теплоты движутся быстрее, а в случае твердого материала быстрее колеблются по сравнению с состоянием равновесия. При этом движении атомы сталкиваются. В результате неупругого столкновения внутренняя энергия одного или обоих атомов возрастает, и энергия движения уменьшается. Одна из возможностей отдачи увеличивающейся внутренней энергии - испускание электромагнитных волн. Во время излучения электронная оболочка атома колеблется как микроскопическая антенна. Электромагнитное излучение либо возбуждает другой атом, либо покидает тело; это и есть тепловое излучение. Поскольку атомы движутся при любой температуре отличной от абсолютного нуля, все тела при любой температуре испускают теплоту. Энергия электромагнитной волны, т.е. сила излучения, при данной

температуре зависит от длины волны.

Испускаемая энергия будет наибольшей при характерной длине волны λ_{ms} , при этом форма кривой «энергия - длина волны» в идеальном случае зависит только от температуры излучающего тела и не зависит от материала. В соответствии с законом Вина, длина волны, соответствующая максимальной испускаемой энергии черным телом, определяется соотношением [11]

$$\lambda_{ms} = 2,9/T, \text{ мм} \quad (5)$$

где T – температура излучающего тела, К.

Так как тепловое излучение является разновидностью электромагнитных волн, для него справедливы все характерные закономерности и явления: интерференция, поляризация, проникание и отражение.

Характерной особенностью излучаемой энергии является то, что в отличие от других основных видов передачи теплоты, здесь нет необходимости в передающем промежуточном веществе, даже наоборот, скорость распространения волны максимальна в вакууме.

Полностью энергию q_e , проходящую через единицу поверхности тел, Вт/м^2 , можно определить суммированием потоков энергии, соответствующих отдельным длинам волн [11]

$$q_e = \int_0^\infty I_e d\lambda \quad (6)$$

Поскольку $I_e = I_e(\lambda, t)$ полный поток энергии зависит от температуры

$$q_e = q_e(T) \quad (7)$$

Поступающее излучение может быть поглощено или отражено материалом, а также пройти сквозь него в зависимости от характера излучения и материала.

Воображаемое тело, поглощающее все поступающие потоки энергии Q_s , называется «абсолютно черным телом», абсорбционная способность которого при $Q_s = Q_a$

$$a = Q_a/Q_s = 1 \quad (8)$$

Согласно закону Планка спектральная интенсивность излучения абсолютно черного тела [11]

$$I_{s\lambda} = \frac{c_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad (9)$$

где e – основание натурального логарифма,

$c_1 = 3,74 \cdot 10^{-16}$, $\text{Вт} \cdot \text{м}^2$ – первая постоянная Планка;

$c_2 = 1,44 \cdot 10^{-2}$, $\text{м} \cdot \text{град}$ – вторая постоянная Планка;

λ – длина волны, м;

T – температура излучающего тела, К.

Модели абсолютно черного тела лучше всего соответствует закрытая полость, на стенке которой имеется очень малое отверстие. Излучение, проникшее в полость через это узкое отверстие, после повторного отражения на стенках с большой вероятностью будет полностью поглощено. Среди реальных тел особенностям абсолютно черных тел лучше всего соответствуют материалы с сильно расчлененной, но тонкой поверхностной структурой (например, иней). С точки зрения поглощения теплового излучения обычно решающее значение имеет тонкая структура поверхности.

Очень гладкие (полированные) поверхности отражают тепловое излучение, и степень отражения (если Q_r - отражаемый поток энергии) значительна

$$r = Q_r / Q_s \quad (10)$$

Способность пропускать тепловое излучение у большинства твердых веществ

$$t = Q_t / Q_s \quad (11)$$

Для реальных тел $a < 1$. Если при этом $a = \text{const}$ и $\lambda = \text{const}$, то, согласно распространенной терминологии, тело называется «серым телом». Однако, поскольку для реальных тел $a = a(\lambda, T, \varphi) \neq \text{const}$, то серое тело можно считать только моделью излучения (угол φ характеризует направление излучения).

Очевидно, что поглощательный, отражательный и пропускательный коэффициенты тела в сумме равны единице

$$a(\lambda, T, \varphi) + r(\lambda, T, \varphi) + t(\lambda, T, \varphi) = 1 \quad (12)$$

Если серое тело $a < 1$, оно поглощает лишь часть поступающей энергии, $Q_a = a \cdot Q_s$, но находясь в тепловом равновесии, столько, же ее испускает, т.е. $Q_e = a \cdot Q_s$ и коэффициент относительного излучения

$$\varepsilon = Q_e / Q_s = a \quad (13)$$

Поэтому при тепловом равновесии, в соответствии с законом Кирхгоффа, способности тел излучать и поглощать теплоту, равны. Характеристики тел тем больше приближаются к характеристикам абсолютно черного тела, чем ближе к 1 значение ε , поэтому ε также называют степенью черноты.

Так как $a(\lambda, T, \varphi)$, то и $\varepsilon(\lambda, T, \varphi)$. Соответствующие значения ε для излучения, поступающего по нормали к поверхности ($\varphi = 0$) при различной температуре, приводятся в справочной литературе.

Анализ значений ε для различных материалов [11] позволяет сделать вывод о том, что в радиационных и радиационно-конвективных системах отопления немаловажным фактором становятся материалы ограждающих конструкций и оборудования. Для них целесообразно применять материалы, имеющие матовую и шероховатую поверхность, окрашенные матовыми масляными красками. Причем, появление на поверхностях в процессе эксплуатации следов сажи, производственной пыли, битума не приведет к снижению способности тел излучать и поглощать теплоту.

Таким образом, для учета конвективных особенностей отопления высоких помещений большого объема производственных помещений и общественных зданий инфракрасными излучателями, систему отопления, использующую комбинацию светлых и темных излучателей, необходимо рассматривать как радиационно-конвективную. Для получения максимального теплового эффекта от инфракрасного излучения необходимо в качестве внутренней отделки помещений, окраски оборудования применять материалы, имеющие при температуре окружающего воздуха (или технологической температуре оборудования) показатель степени черноты, близкий к 1.

Анализ научно-исследовательской, нормативной и технической литературы показал, что на производственных объектах для обеспечения условий теплового комфорта производственного персонала целесообразно применять ГИИ, при этом необходимо обеспечить допустимый уровень теплового излучения. Для учета варьируемых условий работы производственных объектов, размещения крупногабаритного технологического оборудования, возможности возникновения неоднородных температурных полей необходимо учитывать конвективный теплообмен внутри помещений.

Существующие радиационно-конвективные системы отопления на основе ГИИ, как показывают проведенные аналитические исследования, требуют совершенствования в отношении определения режима работы ГИИ.

Список литературы

1. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. - М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 2001. — 20 с.
2. Ничкова Л. А. Севриков В. В., Никитин А. А. Программа счета дозой энергии инфракрасного излучения незащищенного объекта. – Вестник СевНТУ. 2008 - № 88 - С . 184-186.
3. ГОСТ 12.1.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны: дата введения 01.01.1989. - 126 с.
4. ГОСТ 30494-96 Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях: дата введения 03.01.1999. - 17 с.
5. Зиганшин Б. М. Исследование процесса обогрева помещения при помощи газоиспользующих излучающих труб // Сборник научных трудов докторантов и аспирантов. - Казань: 2004. - С. 244-248.
6. Мачкаши А. Основные принципы лучистого отопления больших помещений // Водоснабжение и санитарная техника. - М.: 1964 - № 2 - С. 35-40.
7. Михайлова Л. Ю. Разработка методики расчета радиационного отопления зданий производственного назначения // Диссертация кандидата технических наук. - Тюмень: 2006. - 113 с.
8. Зиганшин Б. М. Численные и экспериментальные исследования параметров теплоотдачи радиационных труб в замкнутом объеме // Проблемы энергетики. - Казань: 2006. - № 3-4 - С. 99-102.
9. Никифоров Г. В. Гибридные системы отопления. - Магнитогорск: 2009. – 79 -с.
10. Шиванов В. В. Энергосберегающие технологии на основе газового лучистого отопления // Сантехника, отопление, кондиционирование. - М.: 2007.-№1-С. 36.
11. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. Новосибирск, Наука, 1970. 659 с.

УДК 697.1: 535.1

Монах Светлана Игоревна,
к.т.н., доцент, доцент каф. ТТГВ;
Рязанцева Людмила Александровна,
ст. преп. каф. ТТГВ;
Рель Юлия Константиновна,
магистрант гр. ЗТГВм-55а,
«ДОННАСА» - филиал НИУ МГСУ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ПОМЕЩЕНИЙ С СИСТЕМАМИ ОТОПЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГАЗОВЫХ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

В данной статье, с целью учета максимально допустимой загрузки газовых инфракрасных излучателей и ограничения времени их непрерывной работы, проведено моделирование теплового баланса производственных помещений большого объема с системами лучистого отопления с учетом коэффициента загрузки отопительного оборудования K_3 . Функциональный анализ системы лучистого отопления на основе уравнения теплового баланса здания, расчета установочной мощности системы отопления и хронометрического анализа схемы технологических процессов в здании позволит рационально спроектировать схему системы отопления зданий больших объемов газовыми инфракрасными излучателями.

Ключевые слова: моделирование теплового баланса, производственные помещения большого объема, коэффициент загрузки, газовые инфракрасные излучатели, результирующий теплообмен излучением, расчет установочной мощности, периодичность работы излучателей

В существующих на сегодняшний день методиках расчета установочной мощности систем отопления с применением низкоинтенсивных «темных» газовых инфракрасных излучателей (ТГИИ) не учитывается фактор максимально допустимой загрузки оборудования, что при понижении температуры наружного воздуха приводит к сокращению срока эксплуатации ТГИИ и преждевременному выходу их из строя.

На основании анализа опубликованных исследований производственных зданий [1, 2, 3], отапливаемых с использованием ТГИИ, спроектированных без учета коэффициента загруженности K_3 , за отопительный сезон из 30 ТГИИ выходят из строя от перегрузки 30÷40 % излучателей.

При расчете установочной мощности системы отопления необходимо учитывать ограничение времени непрерывной работы ТГИИ и обеспечить необходимую периодичность их работы [4].

Обеспечить периодичность работы ТГИИ возможно с помощью введения коэффициента загруженности в уравнение теплового баланса помещения с системой отопления на основе ТГИИ

$$Q_p = Q_{\pi} \quad (1)$$

где Q_p – теплоступления, Вт;

Q_{π} – теплотери, Вт.

$$\begin{cases} Q_p = K_3 \sum_{i=1}^n Q_i^{\text{ггг}} + Q_m \text{ при } K_3 \geq 1 \\ Q_p = \sum_{i=1}^n Q_i^{\text{ггг}} + Q_m \text{ при } K_3 < 1 \end{cases} \quad (2)$$

где K_3 - коэффициент загруженности ТГИИ;

$\sum_{i=1}^n Q_i^{\text{ггг}}$ – суммарные тепlopоступления от газовых инфракрасных излучателей, Вт;

Q_m – общие тепловыделения в производственном здании: от технологического оборудования, освещения, технологических процессов, производственного персонала и пр., Вт.

$$Q_p = Q_{\text{огр}} + Q_v + Q_m \quad (3)$$

где $Q_{\text{огр}}$ - тепlopотери через ограждающие конструкции, Вт;

Q_v – затраты теплоты на нагрев воздуха, поступающего в здание снаружи за счет инфильтрации и вентиляции, Вт;

Q_m - потери теплоты на нагрев производственных изделий, оборудования, материалов, транспортных средств, поступающих в производственное здание снаружи, Вт [5].

Коэффициент загруженности определяется по формуле

$$K_3 = 1 - \frac{T_{\text{пд}} - T_{\text{ф}}}{T_{\text{пд}}} \quad (4)$$

где $T_{\text{пд}}$ - предельно допустимое количество часов работы ТГИИ в сутки (устанавливается в зависимости от класса оборудования в диапазоне от 16,8 до 21,6 часов в сутки);

$T_{\text{ф}}$ - фактическое количество часов работы ТГИИ в сутки.

Коэффициент загруженности в уравнение теплового баланса вводится при $K_3 > 1$, если фактическое количество часов работы ТГИИ превышает допустимое, т.е. $T_{\text{ф}} > T_{\text{пд}}$.

Для определения эффективного излучения от ТГИИ и от поверхностей, находящихся внутри производственного помещения, воспользуемся теоретическими положениями теории теплообмена излучением между телами, одно из которых находится внутри другого [6].

Положение двух поверхностей, обменивающихся тепловым излучением, схематически показано на рис. 1, а. Особенность расположения данных поверхностей заключается в том, что если все излучение, исходящее от всех точек одной из поверхностей, может достигнуть другой поверхности, то в обратном направлении этого не происходит. Геометрическое соотношение поверхностей определяет значение коэффициента облученности между поверхностями, т.е.

$$\varphi_{1-2} = 1 \quad (5)$$

Тогда

$$\varphi_{2-1} = \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \cdot \varphi_{1-2} \quad (6)$$

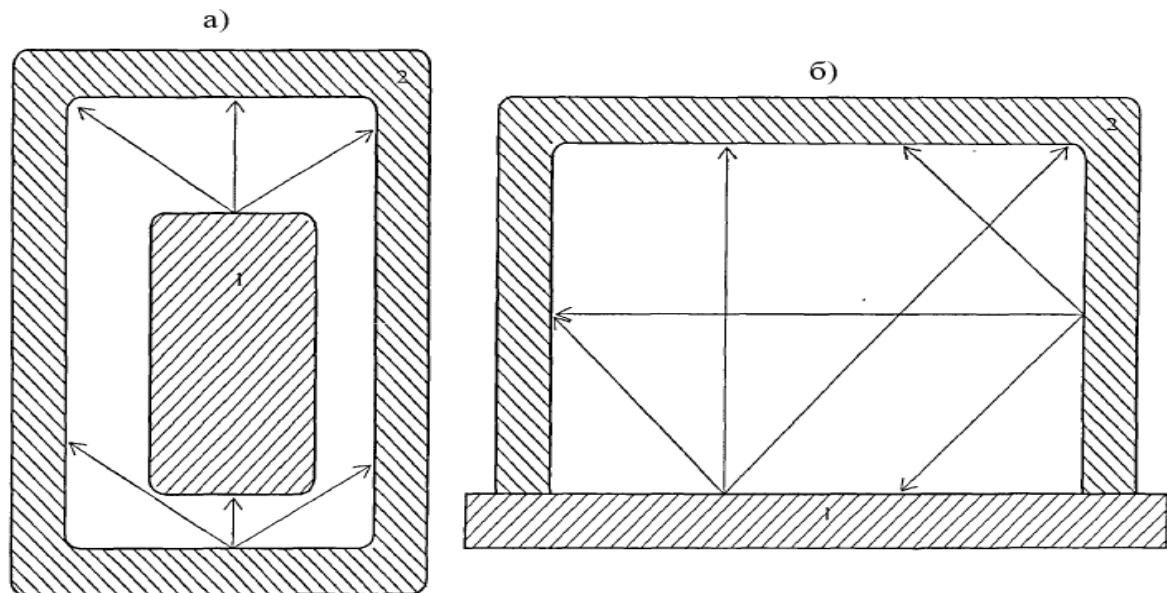


Рисунок 1 - Положение двух поверхностей: а - охватывающих друг друга; б – параллельных

Примем следующее допущение: если поверхность 1 увеличить настолько, что она почти достигнет площади поверхности 2, или развернуть эти поверхности и увеличить их размеры еще больше, то мы получим две такие параллельные друг другу поверхности (рис 1, б), которые излучают только в направлении друг друга, поскольку излучение на краях незначительно мало. При этом

$$\varphi_{1-2} \approx \varphi_{2-1} = 1 \quad (7)$$

Теплообмен излучением между поверхностями математически можно вычислить с учетом геометрических соотношений и коэффициентов излучения (рис. 2).

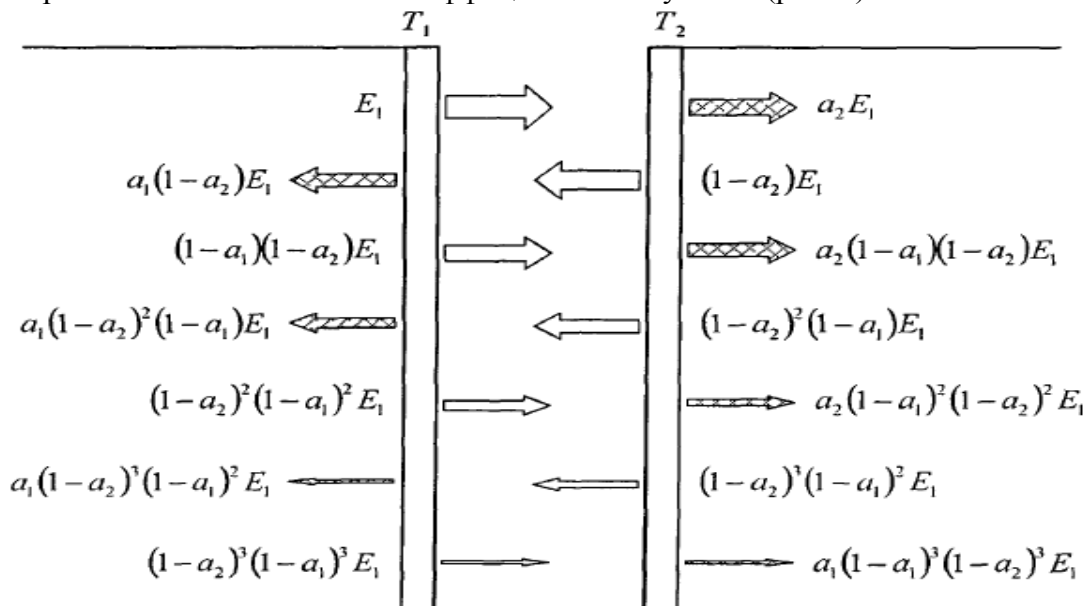


Рисунок 2 – Лучистый теплообмен между двумя охватывающими друг друга поверхностями

Собственное излучение плоской поверхности 1 обозначим E_1 ; поверхность 2 поглощает из него часть $a_2 E_1$, отражает часть $(1 - a_2) E_1$, и т.д. То же самое действительно и для поверхности 2. Собственное и отраженное излучение поверхности образуют эффективное излучение [6]. Его можно определить при расчетах путем суммирования бесконечной геометрической последовательности, выражающей отраженные количества энергии. Иначе говоря, действительное излучение одной из плоских поверхностей образуется собственным излучением и отражаемой частью эффективного излучения другой плоской поверхности [К], т.е. при расчете на единицу поверхности получаем

$$E_{1v} = E_1 + (1 - a_1) \cdot E_{2v} \quad (8)$$

$$E_{2v} = E_2 + (1 - a_2) \cdot E_{1v} \quad (9)$$

Для тел, охватывающих друг друга (для тел, одно из которых находится внутри другого), соотношение теплообмена излучением значительно сложнее, при этом из реального излучения тела 2 тело 1 поглощает только излучение $(\varphi_{2-1} \cdot a_1 \cdot Q_{2v})$ (введение символа Q обусловлено тем, что в данном теплообмене рассматриваются не единичные, а полные поверхности), остальное же излучение, т.е. $(Q_{2v} - \varphi_{2-1} \cdot a_1 \cdot Q_{2v} = Q_{2v}(1 - \varphi_{2-1} \cdot a_1))$, достигает тела 2. В соответствии с этим реальное излучение, достигающее тела 2, состоит из собственного излучения тела 1 и упомянутого выше излучения, не поглощенного телом 1, т.е.

$$A_1 E_1 + Q_{2v}(1 - \varphi_{2-1} \cdot a_1) = Q_{1v} \quad (10)$$

Реальное же излучение тела 2 состоит из собственного излучения $A_2 E_2$, а также излучения $Q_{1v}(1 - a_2)$, не поглощенного из Q_{1v} , т.е.

$$Q_{2v} = A_2 E_2 + Q_{1v}(1 - a_2) \quad (11)$$

И результатом лучистого теплообмена является разность $Q_{1v} - Q_{2v}$.

Вычисляя Q_{1v} и Q_{2v} получим

$$Q_{1v} = \frac{A_1 E_1 + A_2 E_2 (1 - a_1 \varphi_{2-1})}{a_1 \varphi_{2-1} + a_2 - a_1 a_2 \varphi_{2-1}} \quad (12)$$

$$Q_{2v} = \frac{A_2 E_2 + A_1 E_1 (1 - a_2)}{a_1 \varphi_{2-1} + a_2 - a_1 a_2 \varphi_{2-1}} \quad (13)$$

Можно доказать, что для серых тел $Q_{1v} > A_1 E_1$ и $Q_{2v} > A_2 E_2$, поскольку $a_1 < 1$; $a_2 < 1$ и $\varphi_{2-1} \leq 1$.

Результирующий теплообмен излучением между телами 1 и 2 определится по формуле

$$Q_{1-2} = Q_{1v} - Q_{2v} = \frac{A_1 \left(\frac{E_1}{a_1} \right) - \left(\frac{E_2}{a_2} \right)}{\frac{1}{a_1} - \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \left[\left(\frac{1}{a_2} \right) - 1 \right]} \quad (14)$$

или с учетом закона Стефана - Больцмана, по формуле

$$Q_{1-2} = \frac{A_1 c_s \left[\left(T_1/100 \right)^4 - \left(T_2/100 \right)^4 \right]}{1/a_1 - (A_1/A_2) [(1/a_2) - 1]} = A_1 C \left[\left(T_1/100 \right)^4 - \left(T_2/100 \right)^4 \right] \quad (15)$$

Откуда приведенный коэффициент излучения между двумя телами, C , Вт/м²·К⁴

$$C = \frac{c_s}{1/a_1 + (A_1/A_2) [(1/a_2) - 1]} = \frac{1}{1/c_1 + (A_1/A_2) \left[\left(1/c_2 - (1/c_s) \right) \right]} \quad (16)$$

Путем преобразований из выражений (14), (15) и (16) для принятых параллельных поверхностей (т.е. когда $A_1 = A_2$ и $\varphi_{2-1} = 1$) можно получить следующую зависимость

$$Q_{1-2} = \frac{A_1 c_s \left[\left(T_1/100 \right)^4 - \left(T_2/100 \right)^4 \right]}{1/a_1 + 1/a_2 - 1} = A_1 C \left[\left(T_1/100 \right)^4 - \left(T_2/100 \right)^4 \right] \quad (17)$$

А приведенный коэффициент излучения между двумя телами

$$C = \frac{c_s}{1/a_1 + 1/a_2 - 1} = \frac{1}{1/c_1 + 1/c_2 - 1/c_s} \quad (18)$$

Приведенные зависимости доказывают тот очевидный факт, что коэффициент взаимного облучения максимален для охватывающих друг друга тел и минимален, если положение этих двух тел по отношению друг к другу произвольно.

Следует иметь в виду, что при моделировании рассмотрено только влияние теплового излучения. Необходимо, кроме того, принимать во внимание явления теплопроводности и конвекции, и при составлении уравнения теплового баланса (см. уравнение (2)) принимать в расчет коэффициент загрузки K_3

Для практических расчетов разность четвертых степеней температуры в формуле (15) не удобна. Поэтому целесообразно введение в качестве коэффициента, так называемого температурного множителя b_{1-2} , что лианезирует формулу (15) и позволяет использовать ее в инженерных расчетах, использующих шкалу Цельсия

$$b_{1-2} = \frac{\left(T_1/100 \right)^4 - \left(T_2/100 \right)^4}{\tau_1 - \tau_2} \quad (19)$$

Для условий помещения, где значения температуры поверхностей сравнительно мало отличаются друг от друга, при вычислениях температурного множителя можно использовать эмпирическую формулу, предложенную В.Н. Богословским [7]

$$b_{1-2} = 0,81 + (t_1 - t_2) \cdot 0,005. \quad (20)$$

После введения температурного множителя лучистый поток от поверхности 1 к поверхности 2 может быть рассчитан по упрощенной зависимости

$$Q_{1-2} = C_0 \cdot e_{\text{пр.1-2}} \cdot b_{1-2} \cdot \varphi_{1-2} \cdot A_1 \cdot (t_1 - t_2) \quad (21)$$

Таким образом, составление теплового баланса здания с учетом коэффициента загрузки необходимо для вычисления времени непрерывной работы ТГИИ и определения периодичности работы инфракрасных излучателей.

Функциональный анализ системы лучистого отопления на основе уравнения теплового баланса здания, расчета установочной мощности системы отопления и хронометрического анализа схемы технологических процессов в здании позволит рационально спроектировать схему системы отопления зданий больших объемов газовыми инфракрасными излучателями.

Список литературы

1. Голяк С. А., Пятачков В. В. Техничко-экономическая эффективность систем радиационно-конвективного отопления на основе газовых инфракрасных излучателей // Энергобезопасность и энергосбережение. - М.: 2010. - № 3 - С. 22-24.
2. Голяк С. А., Пятачков В. В. Техничко-экономическое сравнение инфракрасных газовых излучателей в зависимости от их единичной мощности // Тезисы докладов международной научно-технической конференции. - Пенза: 2007 - С. 98-99.3. ГОСТ 12.1.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны: дата введ. 01.01.1989. - 126 с.
3. Голяк С. А., Пятачков В. В. Экспериментальное определение локальных температур в зданиях производственного назначения, обогреваемых ГИИ // Строительство и образование. - Екатеринбург: 2008. - № 10 - С. 191-192.5. Зиганшин Б. М. Исследование процесса обогрева помещения при помощи газоиспользующих излучающих труб // Сборник научных трудов докторантов и аспирантов. - Казань: 2004. - С. 244-248.
4. Голяк С. А., Пятачков В. В. Особенности теплового. баланса помещений с системами отопления на основе газовых инфракрасных излучателей // Молодой ученый. - Чита: 2010. - №1-2 - С. 111-113.
5. Голяк С. А., Пятачков В. В. Уточнение параметров теплового баланса зданий с системами радиационно-конвективного отопления // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. - Магнитогорск: 2010. - С. 41-44.
6. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. Новосибирск, Наука, 1970. 659 с.
7. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): учеб. для вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высшая школа, 1982.

УДК 697.11

Монах Светлана Игоревна,
к.т.н., доцент, доцент каф. ТТГВ;
Рязанцев Александр Владимирович,
ст. преп. каф. ТТГВ,
Симуров Дмитрий Александрович,
магистрант гр. ЗТГВм-55а,
ДОННАСА - филиал НИУ МГСУ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УДЕЛЬНОГО ТЕПЛОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ОТОПЛЕНИЕ ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

В данной статье подчеркивается, что нормы расхода тепловой энергии на отопление, рассчитанные для жилых зданий, не могут использоваться для нормирования теплотребления общественных зданий сложной формы, так как при этом не учитываются индивидуальные особенности общественных зданий: величина бытовых тепловыделений, коэффициенты остекленности фасадов, ограничение этажности, объемно-планировочные решения, нормы вентиляционного воздухообмена и ряд других факторов, влияющих на результат эксплуатационных энергозатрат. Установлено, что наиболее рациональными объемно-планировочными решениями протяженных общественных зданий небольшой высоты можно считать планировку "с внутренним двором", которую можно получить в результате соединения отдельных элементов в замкнутые контуры. Авторами получена математическая модель, позволяющая оценивать минимальные показатели удельного теплотребления на отопление зданий сложной конфигурации, получая их количественные значения для наиболее рациональной из всех сложных форм общественных зданий - формы "с внутренним двором".

Ключевые слова: нормирование теплотребления, общественные здания, объемно-планировочные решения, планировка "с внутренним двором", математическая модель, показатели удельного теплотребления, отопление зданий сложной конфигурации.

В Российской Федерации введены строительные нормы энергетической эффективности зданий [1], в связи с чем появилась возможность реализации потребительского подхода к нормированию процессов теплотребления зданий различного назначения. Такой подход позволяет заменить поэлементное нормирование теплозащиты отдельных ограждающих конструкций нормированием по результирующим удельным расходам теплоты на отопление всего здания.

Энергетическая эффективность потребительского подхода определяется научным обоснованием установленных нормативов удельного теплотребления для различных категорий зданий. Однако нормы расхода тепловой энергии на отопление, рассчитанные для жилых зданий [1], используются одновременно для нормирования теплотребления некоторых категорий общественных зданий, например, - общеобразовательных учреждений. При этом не учитываются индивидуальные особенности общественных зданий: величина бытовых тепловыделений, коэффициенты остекленности фасадов, ограничение этажности, объемно-планировочные решения, нормы вентиляционного воздухообмена и ряд других факторов, влияющих на результат эксплуатационных энергозатрат [2, 3, 4, 5].

Следовательно, установленные нормы не позволяют в полной мере реализовать имеющиеся резервы энергосбережения некоторых категорий общественных зданий.

Основная отличительная особенность общественных зданий - их форма, которая далека от формы идеального параллелепипеда. Для ряда категорий зданий введены ограничения по этажности. Предельно допустимая этажность общеобразовательных школ, в соответствии с [6], ограничена четырьмя этажами, а детских садов - двумя. В отличие от жилых - общественные здания, как правило, имеют небольшую высоту и сложную конфигурацию в плане. Следовательно, нормы расхода тепловой энергии на отопление, рассчитанные для жилых зданий, не могут использоваться для нормирования теплопотребления общественных зданий сложной формы.

Необходимо обосновать нормативы удельного теплопотребления на отопление для зданий сложной конфигурации именно общественного назначения.

Любую сложную форму здания можно условно представить состоящей из отдельных соединенных между собой элементов-параллелепипедов.

Наиболее рациональными объемно-планировочными решениями протяженных общественных зданий небольшой высоты можно считать планировку "с внутренним двором" [7], которую можно получить в результате соединения отдельных элементов в замкнутые контуры [6]. Эта планировка часто используется в ДНР для общеобразовательных школ, (например, ОШ № 37 в Червоногвардейском районе г. Макеевки) и принята в качестве базовой при математическом моделировании теплопотребления малоэтажных зданий сложной конфигурации.

Для получения выражения, определяющего удельные расходы тепловой энергии на отопление зданий "с внутренним двором" рассмотрим наиболее простой вариант планировки такого здания, состоящего из четырех элементов, как показано на схеме рис. 1. Стены, расположенные на схеме в плоскости фронтальной проекции, будем условно считать фасадными, а все остальные - боковыми.

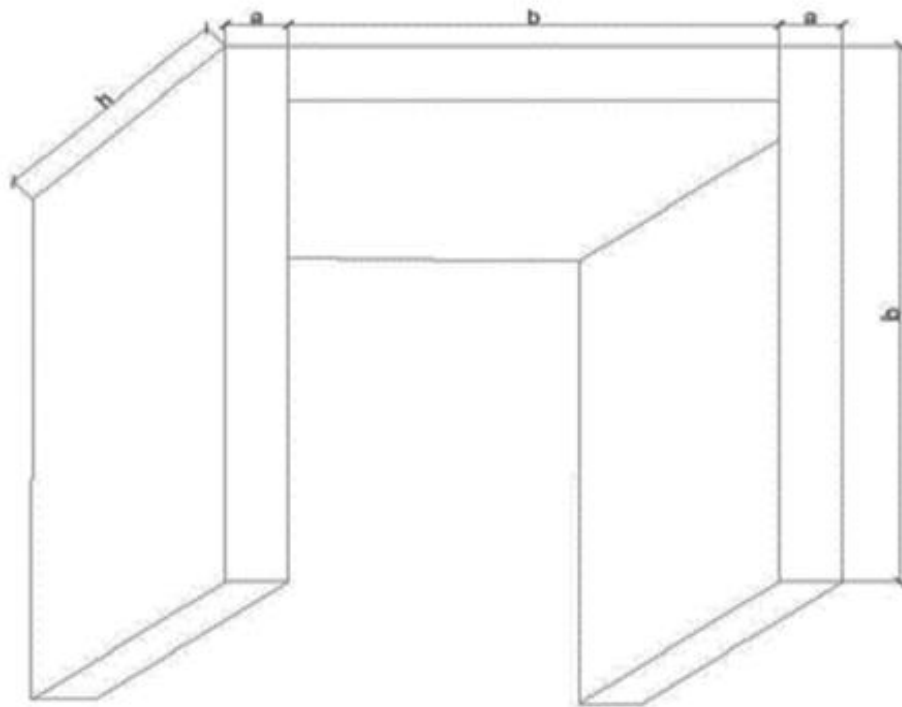


Рисунок 1 – П-образная планировка здания

Общие теплотери здания через наружные ограждающие конструкции Q_h можно представить в виде суммы следующих слагаемых

$$Q_h = \beta \cdot (Q_{\text{фнс}} + Q_{\text{бнс}} + Q_{\text{чп}} + Q_{\text{пп}} + Q_{\text{фок}}^{\text{тр}} + Q_{\text{бок}}^{\text{тр}} + Q_{\text{вент}}^{\text{inf}}) \quad (1)$$

где $Q_{\text{фнс}}$, $Q_{\text{бнс}}$ - теплопотери через фасадные и боковые наружные стены здания за отопительный период, МДж;

$Q_{\text{чп}}$, $Q_{\text{пп}}$ - теплопотери через чердачное и подвальное перекрытия за отопительный период, МДж;

$Q_{\text{фок}}^{\text{тр}}$, $Q_{\text{бок}}^{\text{тр}}$ - трансмиссионные составляющие теплопотерь через окна в фасадных и боковых стенах за отопительный период, МДж;

$Q_{\text{вент}}^{\text{inf}}$ - расход теплоты на нагрев инфильтрующегося через ограждающие конструкции наружного воздуха, требуемого для осуществления нормативного вентиляционного воздухообмена в здании, за отопительный период, МДж;

β - коэффициент, учитывающий дополнительные теплопотери на ориентацию, угловые помещения, поступление холодного воздуха через входы и так далее.

Запишем это выражение в следующем виде

$$Q_h = \beta \cdot (Q_{\text{фнс}} + Q_{\text{фок}}^{\text{тр}}) + \beta \cdot (Q_{\text{бнс}} + Q_{\text{бок}}^{\text{тр}}) + \beta \cdot (Q_{\text{чп}} + Q_{\text{пп}}) + \beta \cdot Q_{\text{вент}}^{\text{inf}} \quad (2)$$

Первые три слагаемых представляют собой суммарные теплопотери за отопительный период соответственно: через фасадные стены с окнами, через боковые стены с окнами и через чердачное и подвальное перекрытия. Введем следующие обозначения

$$\beta \cdot (Q_{\text{фнс}} + Q_{\text{фок}}^{\text{тр}}) = Q_{\text{фнс}}^* \quad (3)$$

$$\beta \cdot (Q_{\text{бнс}} + Q_{\text{бок}}^{\text{тр}}) = Q_{\text{бнс}}^* \quad (4)$$

$$\beta \cdot (Q_{\text{чп}} + Q_{\text{пп}}) = Q_n^{\text{sum}} \quad (5)$$

Запишем выражение (2) с учетом введенных обозначений

$$Q_h = Q_{\text{фнс}}^* + Q_{\text{бнс}}^* + Q_n^{\text{sum}} + \beta \cdot Q_{\text{вент}}^{\text{inf}} \quad (6)$$

Составляющие тепловых потерь, входящие в выражения (3), (4) и (5) могут быть рассчитаны следующим образом

$$Q_{\text{фнс}} = 0,0864 \frac{F_{\text{фнс}}}{R_{\text{фнс}}} \cdot D_d \quad (7)$$

$$Q_{\text{бнс}} = 0,0864 \frac{F_{\text{бнс}}}{R_{\text{бнс}}} \cdot D_d \quad (8)$$

$$Q_{\text{фок}}^{\text{тр}} = 0,0864 \left(\frac{1}{R_{\text{фок}}} - \frac{1}{R_{\text{фнс}}} \right) \cdot F_{\text{фок}} \cdot D_d \quad (9)$$

$$Q_{\text{бок}}^{\text{тр}} = 0,0864 \left(\frac{1}{R_{\text{бок}}} - \frac{1}{R_{\text{бнс}}} \right) \cdot F_{\text{бок}} \cdot D_d \quad (10)$$

$$Q_{\text{чп}} = 0,0864 \frac{F_{\text{чп}}}{R_{\text{чп}}} \cdot n_{\text{чп}} \cdot D_d \quad (11)$$

$$Q_{\text{пп}} = 0,0864 \frac{F_{\text{пп}}}{R_{\text{пп}}} \cdot n_{\text{пп}} \cdot D_d \quad (12)$$

$$Q_{\text{вент}}^{\text{inf}} = q_{\text{вент}}^{\text{inf}} \cdot V_h = 0,024 c_v \cdot n_a \cdot \beta_v \cdot \rho_v \cdot k \cdot D_d \quad (13)$$

где $F_{\text{фнс}}, F_{\text{бнс}}$ - площади фасадных и боковых наружных стен с окнами, м^2 ;

$R_{\text{фнс}}, R_{\text{бнс}}$ - сопротивления теплопередаче фасадных и боковых стен, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$;

$R_{\text{фок}}, R_{\text{бок}}$ - приведенные сопротивления теплопередаче окон в фасадных и боковых стенах, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$;

$F_{\text{фок}}, F_{\text{бок}}$ - площади окон в фасадных и боковых стенах, м^2 ;

c_v - расчётная теплоёмкость воздуха, равная $1,005 \text{ кДж}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}$;

ρ_v - средняя плотность наружного воздуха за отопительный период, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$F_{\text{чп}}, F_{\text{пп}}$ - площади чердачного и подвального перекрытий, м^2 ;

$R_{\text{чп}}, R_{\text{пп}}$ - сопротивления теплопередаче чердачного и подвального перекрытий, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$;

$n_{\text{чп}}, n_{\text{пп}}$ - поправочный коэффициент, зависящий от положения ограждающей конструкции по отношению к наружному воздуху для чердачного и подвального перекрытий.

Подставив выражения (7 – 13) в (3), (4) и (5), получим после преобразований

$$Q_{\text{фнс}}^* = 0,0864 \cdot D_d \cdot \beta \left[\frac{1}{R_{\text{фнс}}} + \rho_{\text{фнс}} \left(\frac{1}{R_{\text{фок}}} - \frac{1}{R_{\text{фнс}}} \right) \right] \cdot F_{\text{фнс}} \quad (14)$$

$$Q_{\text{бнс}}^* = 0,0864 \cdot D_d \cdot \beta \left[\frac{1}{R_{\text{бнс}}} + \rho_{\text{бнс}} \left(\frac{1}{R_{\text{бок}}} - \frac{1}{R_{\text{бнс}}} \right) \right] \cdot F_{\text{бнс}} \quad (15)$$

$$Q_n^{\text{sum}} = 0,0864 \cdot D_d \cdot \beta \left(\frac{n_{\text{чп}}}{R_{\text{чп}}} + \frac{n_{\text{пп}}}{R_{\text{пп}}} \right) \cdot F_{\text{п}} \quad (16)$$

где $\rho_{\text{фнс}}, \rho_{\text{бнс}}$ - коэффициенты остекления фасадных и боковых стен.

$F_{\text{п}}$ - площадь перекрытия, м^2 ;

Разделив левые и правые части выражений (14), (15) и (16) на площади соответствующих ограждающих конструкций, получим выражения для расчёта удельных теплопотерь с 1 м^2 соответственно фасадных стен, боковых стен и перекрытий за отопительный период, получим

$$q_{\text{фнс}}^* = \frac{Q_{\text{фнс}}^*}{F_{\text{фнс}}} = 0,0864 \cdot D_d \cdot \beta \left[\frac{1}{R_{\text{фнс}}} + \rho_{\text{фнс}} \left(\frac{1}{R_{\text{фок}}} - \frac{1}{R_{\text{фнс}}} \right) \right] \quad (17)$$

$$q_{\text{бнс}}^* = \frac{Q_{\text{бнс}}^*}{F_{\text{бнс}}} = 0,0864 \cdot D_d \cdot \beta \left[\frac{1}{R_{\text{бнс}}} + \rho_{\text{бнс}} \left(\frac{1}{R_{\text{бок}}} - \frac{1}{R_{\text{бнс}}} \right) \right] \quad (18)$$

$$q_n^{\text{sum}} = \frac{Q_n^{\text{sum}}}{F_{\text{п}}} = 0,0864 \cdot D_d \cdot \beta \left(\frac{n_{\text{чп}}}{R_{\text{чп}}} + \frac{n_{\text{пп}}}{R_{\text{пп}}} \right) \quad (19)$$

где $q_{\text{фнс}}^*, q_{\text{бнс}}^*$ удельные теплопотери с 1 м^2 фасадных и торцевых стен с окнами за отопительный период, $\text{МДж}/\text{м}^2$;

$q_{\text{п}}^{\text{sum}}$ - удельные теплопотери с 1 м^2 перекрытия за отопительный период, $\text{МДж}/\text{м}^2$.

Выражение (6) с учетом введенных обозначений примет следующий вид

$$Q_h = q_{\text{фнс}}^* \cdot F_{\text{фнс}} + q_{\text{бнс}}^* \cdot F_{\text{бнс}} + q_n^{\text{sum}} \cdot F_{\text{п}} + \beta \cdot Q_{\text{вент}}^{\text{inf}} \cdot V_h \quad (20)$$

Площади перекрытий и наружных стен, а также отапливаемый объем, входящие в выражение (20), выразим через геометрические размеры здания в соответствии со схемой рис. 1. В соответствии с этой схемой основные расчетные зависимости между геометрическими размерами отапливаемого объема здания, имеют следующий вид

$$V_h = 2a \cdot h \cdot [(x + a) + (y + a)] \quad (21)$$

где h - высота отапливаемого объема (по внутреннему обмеру), м;

x, y - размеры в плане стен внутреннего двора (по внутреннему обмеру), м.

$$F_{\text{фнс}} = 4h \cdot (x + a) \quad (22)$$

$$F_{\text{бнс}} = 4h \cdot (y + a) \quad (23)$$

$$F_{\text{п}} = 2a \cdot [(x + a) + (y + a)] \quad (24)$$

Подставив выражения (22 – 24), в (20) получим

$$Q_h = 4h \cdot q_{\text{фнс}}^* (x + a) + 4h \cdot q_{\text{бнс}}^* (y + a) + 2q_n^{\text{sum}} \cdot a[(x + a) + (y + a)] + \beta \cdot Q_{\text{вент}}^{\text{inf}} \cdot V_h \quad (25)$$

Проанализируем выражение, определяющее теплоступления в здание через окна от солнечной радиации Q_s . Исключим из него для упрощения теплоступления через зенитные фонари и получим

$$Q_s = \tau_F k_F \cdot (\rho_{\text{фнс}} F_1 \cdot I_1 + \rho_{\text{бнс}} F_2 \cdot I_2 + \rho_{\text{фнс}} F_3 \cdot I_3 + \rho_{\text{бнс}} F_4 \cdot I_4) \quad (26)$$

где F_1, F_3 - площади противоположных фасадных наружных стен, м^2 ;

F_2, F_4 - площади противоположных боковых наружных стен, м^2 .

В соответствии со схемой рис. 1 площади F_1, F_2, F_3 и F_4 можно выразить следующим образом

$$F_1 = F_3 = 2h \cdot (x + a); F_2 = F_4 = 2h \cdot (y + a) \quad (27)$$

Подставив выражения (27) в (26), после преобразований получим

$$Q_s = \tau_F k_F \cdot 2h \cdot (\rho_{\text{фнс}} (x + a) \cdot (I_1 + I_3) + \rho_{\text{бнс}} (y + a) \cdot (I_2 + I_4)) \quad (28)$$

Последнее слагаемое исходного выражения - бытовые теплоступления в течение отопительного периода - Q_{int} перепишем, подставив в него выражение, определяющее теплоступления в здание через окна от солнечной радиации Q_s , и выразив отапливаемую площадь здания A_1 через отапливаемый объем V_h и высоту этажа $h_{\text{эт}}$, следующим образом

$$Q_{\text{int}} = 0,0864 \cdot D_d \cdot \frac{q_{\text{int}}}{(t_{\text{в}} - t_{\text{ср.о.п.}})} \cdot \frac{V_h}{h_{\text{эт}}} \cdot \beta_v \quad (29)$$

Разделив обе части полученного выражения (29) на отапливаемый объем здания V_h , получим удельную величину бытовых тепловыделений

$$q_{int}^V = \frac{Q_{int}}{V_h} = 0,0864 \cdot D_d \cdot \beta_v \frac{q_{int}}{(t_B - t_{ср.о.п.}) \cdot h_{ЭТ}} \quad (30)$$

где q_{int}^V - удельная величина бытовых тепловыделений на 1м^3 отапливаемого объема здания за отопительный период, МДж/м³.

Выражение (29), с учетом (30), запишем в более простом виде

$$Q_{int} = q_{int}^V \cdot V_h \quad (31)$$

Подставив выражения (25), (28) и (31) в исходную формулу, получим после преобразований выражение, связывающее требуемый расход теплоты на отопление за отопительный период с геометрическими размерами здания

$$Q_h^V = \beta_h (4q_{\text{фнс}}^* \cdot c_\phi \cdot h(x+a) + 4q_{\text{бнс}}^* \cdot c_6 \cdot h(y+a) + 2q_{\text{п}}^{\text{sum}} \cdot a[(x+a) + (y+a)] + \beta \cdot q_{\text{вент}}^{\text{inf}} \cdot V_h - q_{int}^V \cdot V_h \cdot v \cdot \xi) \quad (32)$$

где c_ϕ и c_6 - коэффициенты, учитывающие снижение требуемого расхода теплоты на отопление здания за счет действия солнечной радиации через окна в фасадных и боковых стенах соответственно, определяемые по формулам

$$c_\phi = 1 - \frac{\tau_F \cdot k_F \cdot v \cdot \xi \cdot \rho_{\text{фнс}}}{2q_{\text{фнс}}^*} (I_1 + I_3) \quad (33)$$

$$c_6 = 1 - \frac{\tau_F \cdot k_F \cdot v \cdot \xi \cdot \rho_{\text{бнс}}}{2q_{\text{бнс}}^*} (I_2 + I_4) \quad (34)$$

Из анализа выражения (32), следует, что в него входит отапливаемый объем здания V_h . Разделив обе части выражения (32) на отапливаемый объем V_h и интегральную характеристику отопительного периода D_d , получим выражение для расчета удельных расходов теплоты $q_{h,V}^{\text{des}}$, кДж/(м³·°C·сут.), в следующем виде

$$q_{h,V}^{\text{des}} = \frac{\beta_h \cdot 10^3}{D_d} \left[2q_{\text{фнс}}^* \cdot c_\phi \cdot \frac{(x+a)}{a[(x+a)+(y+a)]} + 2q_{\text{бнс}}^* \cdot c_6 \cdot \frac{(y+a)}{a[(x+a)+(y+a)]} + q_{\text{п}}^{\text{sum}} \cdot \frac{1}{h} + \beta \cdot q_{\text{вент}}^{\text{inf}} - q_{int}^V \cdot v \cdot \xi \right] \quad (35)$$

В связи с тем, что сопротивления теплопередаче $R_{\text{фнс}}$ и $R_{\text{бнс}}$, коэффициенты остекления фасадных - $\rho_{\text{фнс}}$ и боковых стен $\rho_{\text{бнс}}$ нормируются одинаковыми, в соответствии с выражениями (17) и (18) можно считать $q_{\text{фнс}}^* = q_{\text{бнс}}^* = q_{\text{нс}}^*$.

Для дальнейшего упрощения математической модели примем допущение о равенстве сторон внутреннего двора $x = y$. Расчетами установлено, что максимальная погрешность от такого допущения, связанная с различной интенсивностью солнечной радиации по двум взаимно перпендикулярным направлениям, в реальных условиях не может превысить 3,2%. Тогда выражение (35) примет наиболее простой вид

$$q_{h,v}^{des} = \frac{\beta_h \cdot 10^3}{D_d} \left[q_{nc} \frac{c_{\phi} + c_b}{a} + q_{\Pi}^{sum} \cdot \frac{1}{h} + \beta \cdot q_{вент}^{inf} - q_{int}^V \cdot v \cdot \xi \right] \quad (36)$$

Анализируя выражение (36), следует подчеркнуть, что уровень удельного теплopotребления зданий "с внутренним двором" определяется лишь высотой и шириной корпуса, снижаясь по мере роста этих величин. В связи с этим, для зданий "с внутренним двором", в отличие от зданий, имеющих форму параллелепипеда, не существует понятия оптимальной этажности, определяющейся из условия достижения минимума удельных энергозатрат на отопление при заданной ширине и объёме.

Полученное выражение является окончательной математической моделью, позволяющей оценивать минимальные показатели удельного теплopotребления на отопление зданий сложной конфигурации, получая их количественные значения для наиболее рациональной из всех сложных форм общественных зданий - формы "с внутренним двором".

Список литературы

1. СП 50.13330.2024. Свод правил. Тепловая защита зданий. – Москва: ФГУП ЦПП, 2024. 118 с.
2. Матросов Ю.А., Бутовский И.Н. Поэлементное теплотехническое нормирование ограждающих конструкций зданий // Жилищное строительство, 1995, № 12. - С. 6-10.
3. Матросов Ю.А., Бутовский И.Н. Стратегия по нормированию теплозащиты зданий с эффективным использованием энергии // Жилищное строительство, 1999, № 1-3. - С.2-5, 8-9, 13-15.
4. Матросов Ю.А., Бутовский И.Н., Бродач М.М. Здания с эффективным использованием энергии // АВОК № 3-4, 1996. - С. 3-6.
5. Матросов Ю.А., Бутовский И.Н., Голдштейн Д. Новая концепция нормирования теплозащиты зданий // Энергетическая эффективность, ЦЭНЭФ, 1994, №5. - С. 2-5.
6. СП 251.1325800.2016. Здания общеобразовательных организаций. Правила проектирования. Дата введения 2017-02-18.
7. Денисов П.П. Теплоэнергетическая оценка объемно – планировочных решений зданий // Жилищное строительство, 1991. - № 7. - С. 4-8.

УДК 621.4: 699.231

Монах Светлана Игоревна,
к.т.н., доцент, доцент каф. ТТГВ;
Степанчак Алексей Васильевич,
магистрант гр. ЗТГВм-55а;
Симуров Дмитрий Александрович,
магистрант гр. ЗТГВм-55а,
ДОННАСА - филиал ВО НИУ МГСУ

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛОТЫ В ПОЛУОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ

В данной статье на основании установленных закономерностей распространения и аккумуляции теплоты в полуограниченном пространстве ограждения здания получены закономерности распределения температур и тепловых потоков в ограждении здания при подводе теплоты к его наружной поверхности по закону гармонических колебаний и установлена зависимость коэффициента теплоусвоения ограждения здания от изменения мощности отопительных приборов. Полученный математический аппарат позволит рассчитать теплофизические характеристики строительных материалов ограждения по значениям температур и тепловых потоков на его поверхности методом неразрушающего контроля.

Ключевые слова: ограждающие конструкции, распространение теплоты, аккумуляция теплоты, полуограниченное пространство, распределение температур, распределение тепловых потоков, гармонические колебания, коэффициент теплоусвоения, теплофизические характеристики, метод неразрушающего контроля.

Наличие в ограждающих конструкциях различных материальных слоев с отличающимися теплофизическими свойствами (плотностью, теплоемкостью, теплопроводностью, паропроницаемостью, сорбционной способностью), по-разному реагирующих на колебания температуры, и влажности окружающей среды, существенно затрудняет прогнозирование теплотехнического состояния ограждений в эксплуатационных условиях [1], а использование новых, еще недостаточно исследованных теплоизоляционных материалов, может привести к непредсказуемым последствиям.

Комплексное обследование теплотехнического состояния наружных ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий [2] показывает, что практически всегда существует несоответствие теплотехнических характеристик тем величинам, которые были заложены в проектах. Данное несоответствие вызвано не только отклонениями от проектных решений при строительстве, но и вследствие изменения теплотехнических характеристик материальных слоев ограждающих конструкций во время эксплуатации под воздействием постоянно меняющихся температуры и влажности окружающей среды. Кроме того, следует отметить, что действующие нормы и правила проектирования теплозащиты зданий [2] основаны на стационарных расчетах переноса тепла и влаги в ограждающих конструкциях и не учитывают в полном объеме особенностей климата района строительства, что также не может гарантировать надежности теплозащиты во время эксплуатации зданий.

В настоящее время одной из наиболее актуальных проблем является поиск и создание точных, надежных и простых в реализации методов теплового расчета наружных ограждений и потерь теплоты через них, а также оценки теплофизических свойств (ТФС), используемых и

вновь разрабатываемых строительных, теплоизоляционных, облицовочных материалов и изделий. ТФС ограждений существенно влияют на тепловой и воздушный режим зданий различного назначения, а также на работу систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, потребляющих в настоящее время значительное количество тепловой энергии [3].

Поэтому при возведении объектов различного назначения, в ходе строительства, необходимо знание ТФС строительных, теплоизоляционных материалов и изделий, а в процессе эксплуатации здания необходимо проводить мониторинг ТФС материалов ограждений. Информация о свойствах новых, разрабатываемых и используемых материалов позволяет корректно проводить тепловые расчеты систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, выбирать оптимальные варианты эксплуатации и контролировать энергосбережение в зданиях.

Методы предсказания теплофизических свойств ограждений пока еще должного развития не получили, и главным источником информации остается эксперимент [4]. Это требует разработки и внедрения неразрушающих методов контроля ТФС материалов ограждений, основанных на температурных и тепловых измерениях на поверхности, которые практически позволят оценить их влияние на энергосбережение при эксплуатации здания.

В настоящее время перспективным является подход к проектированию многослойных ограждающих конструкций зданий, основанный на многовариантных предпроектных расчетах их тепловлажностного состояния, и оценке их теплотехнической эффективности в эксплуатационных (нестационарных) условиях.

Для реализации такого подхода необходима достаточно простая инженерная методика расчета теплообмена в ограждениях зданий и определения теплофизических характеристик ограждений зданий по значениям теплового потока и естественного колебания температуры на поверхности ограждения здания в течение суток [4]. Следовательно, необходимо проанализировать и установить закономерности распространения теплоты в наружных ограждениях в эксплуатационных условиях.

При симметричном нагревании (охлаждении) тела квадратного (или прямоугольного) сечения бесконечной длины от начальной температуры T_0 , когда тепловое возмущение не затрагивает центральные участки, данное тело можно считать полуограниченным пространством.

Плоская стена ограждения здания или сооружения также может считаться полуограниченным пространством, пока тепловое возмущение в достаточной мере не проникнет сквозь всю ее толщину (массив бесконечной толщины).

Кроме того, учитывается, что полупространство однородно и изотропно, физические свойства его постоянны, деформации внутри объема массива (в связи с температурным напряжением) незначительны по сравнению с объемом и макрочастицы внутри массива неподвижны относительно друг друга.

Если массив (полупространство) с начальной температурой T_0 подвергается внезапно нагреву со стороны поверхности до температуры T_c и поддерживается неизменной на протяжении всего времени релаксации, то процесс переноса теплоты в массиве описывается уравнением Фурье [5]

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (1)$$

Со следующими начальными и граничными условиями

$$T_{\tau=0} = T_0; \quad T_{x=0} = T_c. \quad (2)$$

Для решения уравнения (1) введем понятие избыточная температура

$$\vartheta = (T_c - T) \quad \text{и} \quad \vartheta_0 = (T_c - T_0). \quad (3)$$

Тогда уравнение (1) будет иметь вид

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2}. \quad (4)$$

В процессе распространения теплоты в полуограниченном пространстве тепловой поток в любом сечении определяется по закону Фурье [5]

$$q = -\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x}. \quad (5)$$

Распространение температуры внутри массива можно записать в виде

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = \frac{d\vartheta}{dZ} \cdot \frac{\partial Z}{\partial x} \quad (6)$$

где $Z = \frac{x}{\sqrt{4a\tau}}$ – безразмерный комплекс;

a – коэффициент температуропроводности массива, м²/с;

τ – время релаксации, с.

Тепловой поток на поверхности массива [6, 7]

$$q_n = \frac{2\vartheta_0}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\lambda}{\sqrt{4a\tau}} = \sqrt{\frac{\lambda_{cp}}{\pi\tau}} \cdot \vartheta_0 = B \cdot \vartheta_0, \quad (7)$$

где λ – коэффициент теплопроводности массива Вт/(м·К);

a – коэффициент температуропроводности массива, м²/с;

$(c\rho)$ – объемная теплоемкость массива, кДж/(м³·К);

τ – время релаксации, с;

B – коэффициент теплоусвоения.

Коэффициент теплоусвоения B характеризует теплоаккумулирующую способность массива

$$B = \sqrt{\frac{\lambda_{cp}}{\pi\tau}} = \frac{b}{\sqrt{\pi\tau}}, \quad (8)$$

где $b = \sqrt{\lambda_{cp}}$ – коэффициент тепловой активности вещества массива.

При термической релаксации коэффициент теплоусвоения массива – это отношение теплового потока на поверхности в данный момент времени q_n к постоянной максимальной разности температур в системе ϑ_0

$$B = \frac{q_n}{\vartheta_0}. \quad (9)$$

В процессе нагрева массива и его полной релаксации произойдет накопление или аккумуляция теплоты, которая определяется из уравнения

$$Q = \int_0^{\tau} q_n(\tau) d\tau, \quad (10)$$

или с учетом выражения (7).

$$Q = \vartheta_0 \int_0^{\tau} B(\tau) d\tau. \quad (11)$$

Ограждения жилых и общественных зданий за одни сутки подчиняются закону простого гармонического колебания – температура внутренней поверхности ограждения остается примерно постоянной, а температура наружной поверхности ограждения здания изменяется [8, 9]. В дневные часы температура ограждения здания на наружной поверхности выше, а в ночные часы – ниже. Плотность теплового потока q_n на поверхности ограждения здания изменяется в течение суток – в ночные часы q_n выше, а в дневные часы q_n – ниже.

Гармонические колебания температур в ограждении здания происходят по закону косинуса и могут быть рассмотрены путем наложения косинусоид [8,9]. На рис. 1 приведен график распределения температур и тепловых потоков в ограждении здания при циклическом (в течение суток) подводе теплоты к его наружной поверхности. В процессе изменения температуры на наружной поверхности ограждения здания ($x=0$) в прямом и обратном направлениях внутри ограждения здания удастся получить температурные волны, которые угасая, идут в глубину объема массива.

Если процесс тепловых колебаний на наружной поверхности ограждения здания происходит достаточно часто, то начальные условия не будут сказываться на распределении температуры. То есть начальные условия в условиях однозначности можно не рассматривать.

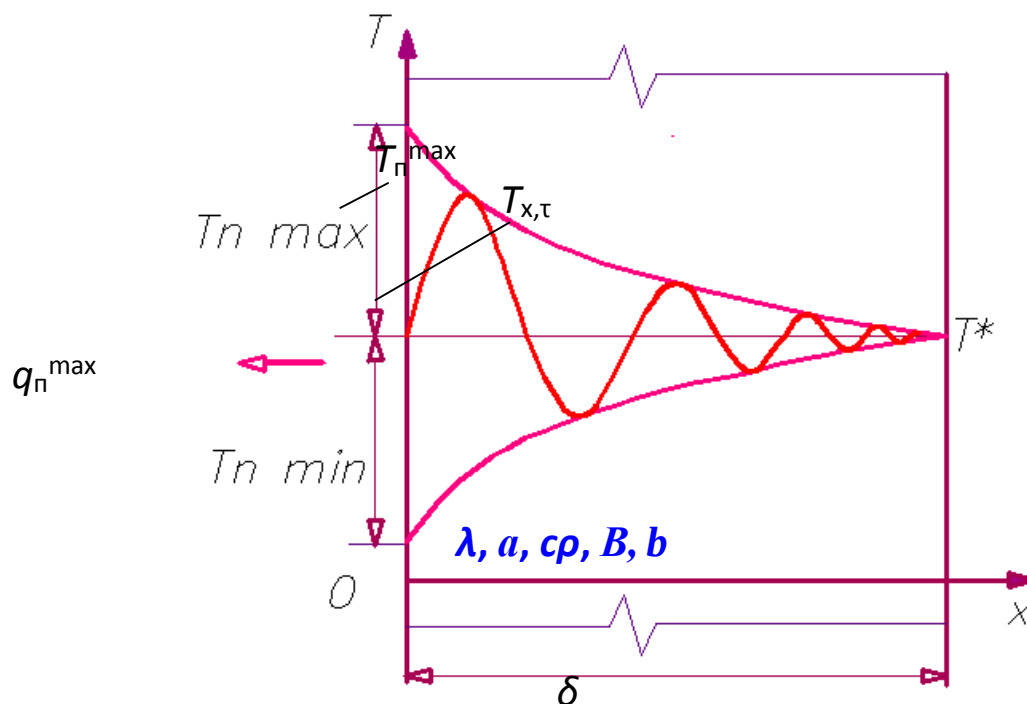


Рисунок 1 - График распределения температур в ограждении здания при циклическом (в течение суток) подводе теплоты к его наружной поверхности

$\lambda, a, c\rho, B, b$ - соответственно для ограждения здания:

коэффициент теплопроводности - λ , Вт/(м·К);

коэффициент температуропроводности - a , м²/с;

объемная теплоемкость - $(c\rho)$, кДж/(м³·К);

коэффициент теплоусвоения – B , Вт/м²·К;

коэффициент тепловой активности вещества – b ;

$T_{x,\tau}$ - температурные волны в ограждении;

T^* - температура релаксации, К;

$T_{\Pi}^{\max}$, $T_{\Pi}^{\min}$ – максимальная (в дневные часы) и минимальная (в ночные часы) температура на наружной поверхности ограждения здания, К;

q_n - плотность теплового потока на внутренней поверхности ограждения здания, Вт/м² ;

$q_{\Pi}^{\max}$ - максимальный удельный тепловой поток на наружной поверхности ограждения здания (в ночные часы), Вт/м²;

$q_{\Pi}^{\min}$ - минимальный удельный тепловой поток на наружной поверхности ограждения здания (в дневные часы), Вт/м².

Кроме того, принимая, что ограждение здания однородно и изотропно, физические свойства его постоянны и не зависят от температуры и влажности, деформации внутри объема ограждения (в связи с температурными напряжениями) незначительны по сравнению с объемом и макрочастицы внутри ограждения здания неподвижны относительно друг друга.

Дифференциальное уравнение для одномерной задачи, описывающее явление распространения температурных волн, имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (12)$$

Для решения уравнения (12.) воспользуемся избыточными температурами:

$\vartheta_{x,\tau} = (T_{x,\tau} - T^*)$ – избыточные температурные волны;

$\vartheta_{\Pi}^{\max} = (T_{\Pi}^{\max} - T^*) = (T_{\Pi}^{\max} - T_{\Pi}^{\min})$ – амплитуда колебаний на наружной поверхности ограждения здания;

$\vartheta_x^{\max} = (T_x^{\max} - T^*)$ – затухающие амплитуды колебаний по глубине (максимальное отклонение температуры по глубине ограждения здания).

Косинусоида температурных колебаний на внутренней поверхности ограждения здания имеет вид [10]

$$\vartheta_{(0,\tau)} = \vartheta_{\Pi}^{\max} \cdot \cos(\omega, \tau), \quad (13)$$

где ω — частота колебаний.

Частота колебаний численно равна

$$\omega = 2\pi/z, \quad (14)$$

где z — полный период колебаний.

Решение системы уравнений (12) и (13) имеет вид

$$\vartheta_{(x,\tau)} = \vartheta_{\Pi}^{\max} \cdot \cos(\omega\tau - kx) \cdot e^{-kx}. \quad (15)$$

Коэффициент k численно равен

$$k = \sqrt{\frac{\omega}{2a}}, \quad (16)$$

где a - коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$.

Гармонические колебания температур считаются затухшими, если максимальная избыточная температура на внутренней поверхности ограждения здания (на глубине $x = \delta$) $\vartheta_{x=\delta}^{\max}$ составляет 0,5...1 % от максимальной избыточной температуры на наружной поверхности ограждения здания. В этом случае соблюдаются два соотношения:

$$\frac{\vartheta_{x=L}^{\max}}{\vartheta_{\pi}^{\max}} = 0,005 \div 0,01;$$

$$\cos(\omega\tau - kx) = 1.$$

Уравнение (14) примет вид

$$\vartheta_x^{\max} = \vartheta_{\pi}^{\max} \cdot e^{-kx} \quad (17)$$

Согласно уравнению (17) экспонента равна:

$$e^{kx} = 0,005 \div 0,01.$$

Выделим два режима

$$e^{kx} = 0,005 \text{ и } e^{kx} = 0,01.$$

Прологарифмировав последние выражения, получим

$$kx = 4,6 \text{ и } kx = 5,3.$$

Среднее значение kx составит $kx = 4,95$.

Тогда глубина заметного проникновения температурных волн в ограждении зданий составляет

$$L = \frac{4,95}{R} = 4,95 \sqrt{\frac{2a}{\omega}}. \quad (18)$$

Согласно закону Фурье плотность теплового потока на поверхности ограждения здания (рисунок 1) определяется из соотношения

$$q_{\pi,\tau} = -\lambda \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right)_{\pi}. \quad (19)$$

Используя соотношение (14), избыточная температура на наружной поверхности (при $x = 0$) имеет вид

$$\vartheta_{\pi,\tau} = \vartheta_{\pi}^{\max} \cdot \cos(\omega\tau). \quad (20)$$

Тогда выражение (19) примет вид

$$q_{\pi,\tau} = \lambda \cdot k \cdot \sqrt{2} \cdot \vartheta_{\pi}^{\max} \cdot \cos\left(\omega\tau + \frac{\pi}{4}\right) \quad (21)$$

Согласно выражению (2.15) уравнение (2.21) запишется

$$q_{\pi,\tau} = \sqrt{\lambda(c\rho)\omega} \cdot \vartheta_{\pi}^{\max} \cdot \cos\left(\omega\tau + \frac{\pi}{4}\right). \quad (22)$$

Окончательно плотность теплового потока на наружной поверхности ограждения здания

$$q_{n,\tau} = B \cdot \vartheta_n^{\max} \cdot \cos\left(\omega\tau + \frac{\pi}{4}\right). \quad (23)$$

Как уже отмечалось, параметр B характеризует аккумулирующую способность ограждения здания и носит название коэффициента теплоусвоения

$$B = \sqrt{\lambda \cdot (c\rho) \cdot \omega}. \quad (24)$$

Если за период колебаний температуры на наружной поверхности ограждения здания взять одни сутки, а глубину проникновения температурных волн согласно (18)

$$L = 4,95 \sqrt{\frac{2a}{\omega}}, \quad (25)$$

то косинус будет равна единице

$$\cos\left(\omega\tau + \frac{\pi}{4}\right) = 1. \quad (26)$$

Максимальная плотность теплового потока на наружной поверхности ограждения здания в этом случае будет рассчитываться по выражению

$$q_{n,\tau}^{\max} = B \cdot \vartheta_n^{\max}. \quad (27)$$

В процессе распространения температурных волн в ограждении здания коэффициент теплоусвоения остается постоянным и составляет

$$B = \frac{q_{n,\tau}^{\max}}{\vartheta_n^{\max}}. \quad (28)$$

В количественном выражении коэффициент теплоусвоения B ограждения здания при температурных колебаниях на поверхности – это отношение максимального теплового потока на поверхности к максимальному отклонению температуры на наружной поверхности.

Иногда в помещении здания наблюдается колебание мощности отопительных приборов, что приводит к накоплению или расходу тепловой энергии ограждениями.

С санитарно-гигиенической точки зрения ограждения зданий с высокими значениями коэффициента теплоусвоения являются более удовлетворительными в виду того, что температура воздуха в помещении в этом случае будет более равномерной во времени, за счет компенсации накопленной или расходуемой ограждением здания тепловой энергии.

Параллельно температурным волнам в ограждении здания имеет место теплопередача, сопровождающаяся накоплением или расходом тепловой энергии. В течении суток практически происходит повторение одного и того же теплового цикла и имеют место полупериодические процессы накопления и расхода тепловой энергии. По закону сохранения энергии в ограждении здания происходит накопление и расход тепловой энергии численно равные между собой, но отличающиеся по знаку. Интегрированное количество удельной аккумулированной теплоты в тепловом процессе или расходуемой от ограждения определится из выражения

$$Q_{уд.} = \pm \int_0^{0,5Z} q_{п} \cdot d\tau = \pm \vartheta_{п}^{max} \cdot B \cdot \sqrt{2} \cdot \omega^{-1} = \pm \vartheta_{п}^{max} \sqrt{\frac{\lambda(c_p)}{\pi \cdot z}} = \\ = \pm \vartheta_{п}^{max} \cdot B \cdot (\pi \cdot z)^{-0,5}, (Вт/м^2) \quad (29)$$

где $q_{п}$ - удельный тепловой поток, Вт/м²;

z - полный период колебаний, с;

B - коэффициент тепловой активности вещества (массива) $\sqrt{Вт/(м \cdot K)}$;

ω - частота колебаний, 1/с;

λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·K);

(ср) — объемная теплоемкость массива, кДж/(м³·K).

Коэффициент тепловой активности вещества (массива) численно равен

$$B = \sqrt{\lambda_{ср}}. \quad (30)$$

Частота колебаний температурных волн

$$\omega = 2\pi/z. \quad (31)$$

Таким образом, на основании установленных закономерностей распространения и аккумуляции теплоты в полуограниченном пространстве ограждения здания получены закономерности распределения температур и тепловых потоков в ограждении здания при подводе теплоты к его наружной поверхности по закону гармонических колебаний и установлена зависимость коэффициента теплоусвоения ограждения здания от изменения мощности отопительных приборов. Полученный математический аппарат позволит рассчитать теплофизические характеристики строительных материалов ограждения по значениям температур и тепловых потоков на его поверхности методом неразрушающего контроля.

Список литературы

1. СП 50.13330.2024. Свод правил. Тепловая защита зданий. – Москва: ФГУП ЦПП, 2024. 118 с.
2. Гусева Л. И. Комплексные исследования теплофизических характеристик теплоизоляционно-теплозащитных материалов длительного и многократного применения. - Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М. 1981. 20 с.
3. Бойков Г. П., Видин Ю. В., Фокин В. М. Определение теплофизических свойств строительных материалов // Изд-во Красноярского университета. 1992. 172 с.
4. Ковылин А. В., Фокин В. М. Методика определения коэффициентов теплопроводности, теплоусвоения, тепловой инерции, температуропроводности и объемной теплоемкости строительных и теплоизоляционных материалов методом неразрушающего контроля // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Строительство и архитектура. Волгоград : ВолгГАСУ, 2010. Вып.19 (38). С. 112—117.
5. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. Новосибирск, Наука, 1970. 659 с.
6. Иванов В.В. Карасева Л.В., Тихомиров С.А. Нестационарный теплоперенос в многослойных строительных конструкциях. // Известия вузов. Строительство. -2001. №9-10. С. 7—10.
7. Иванов В.В., Карасева Л.В., Сохно И.И. Исследование процессов радиационно-конвективного прогрева ограждающих конструкций. // Известия вузов Северо-Кавказский

регион. Технические науки. — 2003. - №3.

8. Богословский В. Н. Тепловой режим здания. М.: Стройиздат, 1979. -248 с.

9. Богословский В. Н. Строительная теплофизика. М.: Высшая школа. 1982. – 415 с.

10. Бойков Г. П., Видин Ю. В., Журавлев В. Н. Основы тепломассообмена / Красноярск, 2000. 272 с.

УДК 621.4: 699.231

Монах Светлана Игоревна,
к.т.н., доцент каф. ТТГВ;
Степанчак Алексей Васильевич,
магистрант гр.ЗТГВм-55а;
Сулейманов Андрей Энверович,
студент гр.ТГВ-58а,
ДОННАСА - филиал НИУ МГСУ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ НА НАРУЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ ТЕМПЕРАТУР НАРУЖНОГО И ВНУТРЕННЕГО ВОЗДУХА

В данной статье с целью обеспечения в процессе эксплуатации здания проведения мониторинга теплофизических свойств материалов ограждений по значениям температур и тепловых потоков на их поверхностях методом неразрушающего контроля, для различных вариантов эксплуатации определены распределения температур и удельных тепловых потоков в толще ограждений при гармоническом подводе теплоты как к наружной, так и ко внутренней поверхностям ограждения здания.

Ключевые слова: ограждающие конструкции, распространение теплоты, распределение температур, распределение тепловых потоков, гармонические колебания, мониторинг, теплофизические свойства, метод неразрушающего контроля.

Проблемы энергосбережения и снижения потерь теплоты в окружающую среду существенно влияют на экологическую ситуацию, технико-экономические показатели и капитальные затраты на ограждения зданий. Для решения этих задач нужно знать теплофизические свойства (ТФС) строительных материалов наружных ограждений зданий - коэффициенты теплопроводности, температуропроводности, теплоемкость. На некоторые изделия и материалы ограждений паспортные данные есть, на другие - нет. Кроме того, фактические свойства материалов ограждений зданий могут изменяться в процессе эксплуатации и не соответствовать их сертификату.

Поэтому в ходе строительства зданий различного назначения, необходимо знание ТФС строительных, теплоизоляционных материалов и изделий, а в процессе эксплуатации здания необходимо проводить мониторинг ТФС материалов ограждений по значениям температур и тепловых потоков на их поверхностях методом неразрушающего контроля. Информация о теплофизических свойствах используемых материалов позволяет корректно проводить тепловые расчеты систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, выбирать оптимальные варианты эксплуатации и контролировать энергосбережение в зданиях.

Нормативные документы [1] предусматривают теплотехнический расчет ограждений при стационарном тепловом режиме, который предполагает неизменными во времени температуры наружного и внутреннего воздуха. В этом случае теплотери помещений можно считать равными мощности системы отопления.

На практике температура наружного воздуха непрерывно изменяется, что вызывает соответствующие изменения температур внутренних поверхностей ограждений и внутреннего воздуха. На территориях с неустойчивой зимой возможны колебания температуры наружного воздуха от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ограждения изменяют температуру в своей толще с различной скоростью в зависимости от их массы, теплопроводности и теплоемкости конструкционных материалов и др.

Периодические и значительные по своей величине колебания температуры наружного и

внутреннего воздуха определяют дополнительные требования помимо тех, которые предъявляются расчетами для установившихся потоков теплоты. Колебания температур и тепловых потоков на поверхностях наружных ограждений при периодических тепловых воздействиях рассчитывают с помощью теории теплоустойчивости.

Колебания температуры наружного воздуха считают гармоничными и периодическими, происходящими по косинусоиду [2].

При правильных гармоничных колебаниях температура наружного воздуха t_n изменяется около своего среднего значения t_{no} с периодом z так, что в любой момент времени ϑ , ч, ее величина равна

$$t_n = t_{no} + A_{t_n} \cdot \cos \frac{2\pi}{z} \cdot \vartheta \quad (1)$$

где A_{t_n} – максимальное отклонение температуры от ее среднего значения или амплитуда колебания температуры наружного воздуха;

z – период колебаний.

Таким же образом могут быть описаны в виде формул и представлены в векторной форме правильные гармонические изменения температур и тепловых потоков в любом сечении ограждения [3].

При двухстороннем колебании температур на наружной и внутренней поверхности ограждения здания происходит наложение косинусоид, что математически представляет большую сложность и громоздкость [4, 5].

В ходе моделирования тепловых потоков на наружных поверхностях ограждений зданий при колебаниях температур наружного и внутреннего воздуха с целью упрощения рассмотрим однородную стенку – наружное ограждение здания толщиной δ , с коэффициентом теплопроводности λ , коэффициентом температуропроводности a и объемной теплоемкостью ($ср$).

Практически все тепловые процессы в ограждении здания сводятся к ряду возможных вариантов эксплуатации. Наиболее вероятны и продолжительны следующие 4 варианта эксплуатации.

1 вариант: стационарный тепловой режим, когда температура наружного воздуха и внутреннего воздуха помещения остаются постоянными.

Схематичное распределение температуры и удельного теплового потока по толщине ограждения здания в стационарном режиме приведены на рисунке 1.

В этом случае соблюдается стационарный тепловой режим, когда температура наружного воздуха и внутреннего воздуха помещения остаются постоянными. Соответственно температура на наружной T_{n1} и на внутренней T_{n2} поверхности ограждения здания остаются постоянными во времени. Причем возможно два случая, когда $T_{n1} > T_{n2}$ (летний режим) или $T_{n1} < T_{n2}$ (переходный и зимний режим). Вектор удельного теплового потока q_n в этих случаях направлен от поверхности ограждения с большей температурой к поверхности с меньшей температурой.

Если начало координат ограждения оставить в одном положении, как показано на рис. (1а) и (1б), то в случае летнего режима тепловая энергия идет от наружного ограждения здания, а проникающая теплопередача направлена внутрь помещения.

Распределение температуры внутри плоской стенки ограждения в случае «а» (рис. 1) имеет линейный характер.

$$T_x = T_{n1} - \frac{T_{n1} - T_{n2}}{\delta} \cdot x. \quad (2)$$

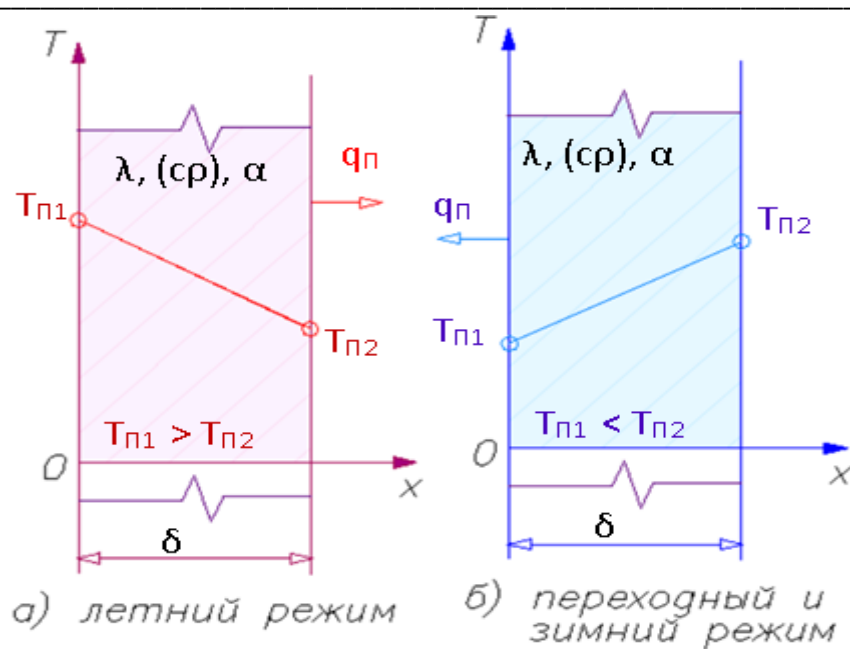


Рисунок - 1 Распределение температуры и удельного теплового потока по толщине ограждения здания в стационарном режиме

Тепловой поток на внутренней и на наружной поверхности ограждения

$$q_{п}^л = \frac{\lambda}{\delta} (T_{п1} - T_{п2}). \quad (3)$$

В зимний и переходный периоды года тепловой поток направлен от внутреннего ограждения здания, а проникающая теплопередача направлена наружу ограждения здания. Распределение температуры внутри плоской стенки ограждения и удельный тепловой поток в случае «б» (рис. 1) определяются по уравнениям

$$T_x = T_{п2} - \frac{T_{п2} - T_{п1}}{\delta} (\delta - x); \quad (4)$$

$$q_{п}^з = \frac{\lambda}{\delta} (T_{п2} - T_{п1}) \quad (5)$$

2 вариант: тепловой режим, при котором температура на наружной поверхности остается постоянной, а температура на внутренней поверхности изменяется по гармоническому закону.

Если температура на наружной поверхности $T_{н1}$ остается постоянной, а температура на внутренней поверхности $T_{н2}$ изменяется по гармоническому закону, описываемому уравнением [5]

$$\vartheta_x = \vartheta_{п2}^{\max} \cdot e^{-kx} \quad (6)$$

Такой случай возможен при циклическом включении и выключении системы кондиционирования воздуха (или системы отопления) внутри помещения здания.

Распределение температуры и удельного теплового потока по толщине ограждения при гармоническом изменении температуры внутри помещения приведены на рисунке 2.

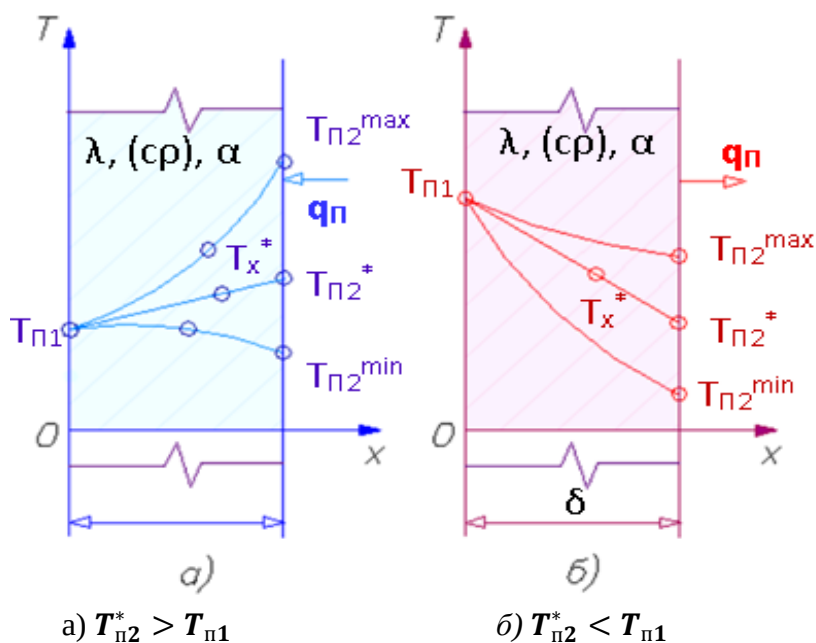
Избыточная температура на внутренней поверхности ограждения будет равна

$$\vartheta_{n2}^{\max} = T_{n2}^{\max} - T_{n2}^* = T_{n2}^* - T_{n2}^{\min} = 0,5(T_{n2}^{\max} - T_{n2}^{\min}) \quad (7)$$

Причем, возможно два случая, когда $T_{n2}^* > T_{n1}$ и $T_{n2}^* < T_{n1}$.

Вектор удельного теплового потока q_n в этих случаях направлен от поверхности ограждения с большей температурой к поверхности ограждения с меньшей температурой.

Если начало координат ограждения здания оставить в положении на наружной поверхности стены, как показано на рис. 2, то в случае противоположного направления оси x и распределения температурной волны, во всех выражениях необходимо вместо x подставить $(\delta - x)$.



T_{n1} - температура наружной поверхности, К; T_{n2} - температура внутренней поверхности, К; T_x^* - температура между максимальным и минимальным отклонением (средняя) по сечению ограждения, К; q_n - удельный тепловой поток, Вт/м²; λ - коэффициент теплопроводности материала ограждения, Вт/(м·К); α - коэффициент температуропроводности материала ограждения, м²/с; ср - объемная теплоемкость ограждения, кДж/(м³·К); δ - толщина стены ограждения здания, м.

Рисунок 2 - Распределение температуры и удельного теплового потока в ограждении при гармоническом изменении температуры внутри помещения

Распределение амплитуды температурной волны по сечению ограждения имеет вид

$$\vartheta_x = \vartheta_{n2}^{\max} \cdot e^{-k(\delta-x)} \quad (8)$$

Распределение колебаний температуры по сечению ограждения, относительно средней T_x^* температуры определится из выражения

$$T_x = T_x^* \pm \vartheta_{n2}^{\max} \cdot e^{-k(\delta-x)} \quad (9)$$

Коэффициент « k » в выражениях (8) и (9) численно равен

$$k = \sqrt{\frac{\pi}{a \cdot z}} \quad (10)$$

где a - коэффициент температуропроводности материала ограждения, $\text{м}^2/\text{с}$;

z - период колебания температурной волны на поверхности, с.

Удельный тепловой поток на внутренней поверхности ограждения здания в случае «а» (рисунок 2) определится из выражения

$$q_{\text{п}} = -\lambda \left(\frac{dT_x}{dx} \right)_{x=\delta} = q_{\text{п2}}^* + \lambda \cdot \vartheta_{\text{п2}}^{\text{max}} \cdot k, \quad (11)$$

где $q_{\text{п2}}^*$ - среднее значение теплового потока на внутренней поверхности ограждения, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

λ - коэффициент теплопроводности материала ограждения, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

$\vartheta_{\text{п2}}^{\text{max}}$ - избыточная температура на внутренней поверхности ограждения, К;

k — коэффициент определяемый по формуле (10.).

Удельный тепловой поток на внутренней поверхности ограждения здания в случае «б» (рис. 2) определится из выражения

$$q_{\text{п}} = \lambda \cdot \vartheta_{\text{п2}}^{\text{max}} \cdot k - q_{\text{п2}}^*. \quad (12)$$

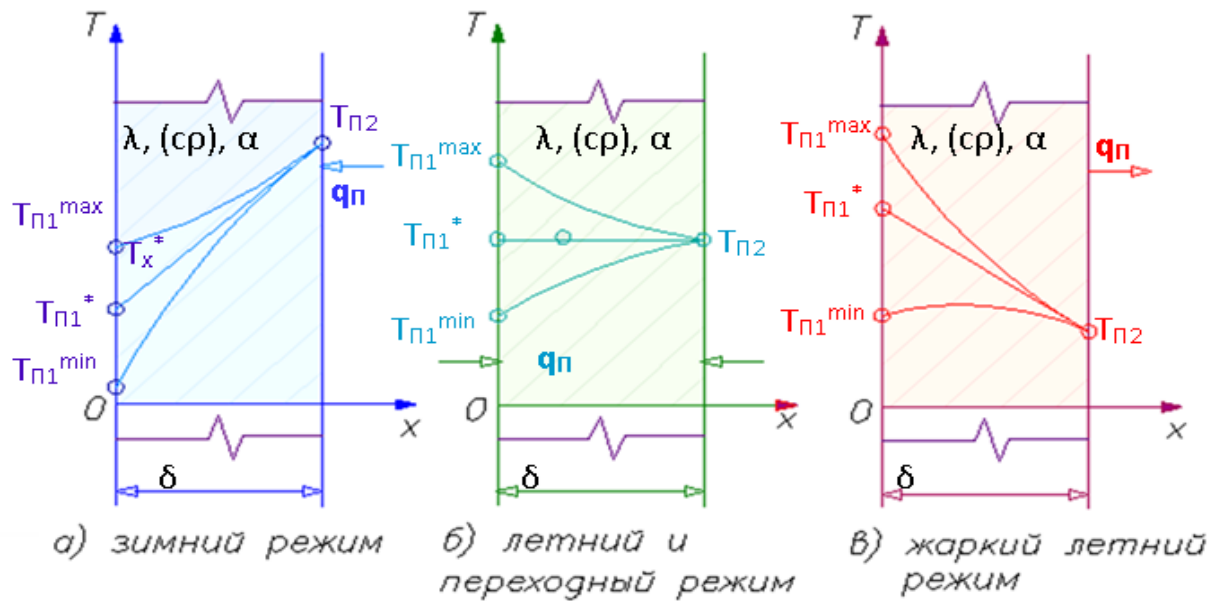
3 вариант: тепловой режим, при котором температура на внутренней поверхности ограждения здания остается постоянной, а температура на наружной поверхности ограждения изменяется по гармоническому закону.

Если температура в помещении и на внутренней поверхности ограждения здания T_{n2} остается постоянной, а температура на наружной поверхности ограждения здания изменяется по гармоническому закону, описываемому выражением (6).

В этом случае распределение температуры и удельного теплового потока по толщине ограждения при гармоническом изменении температуры снаружи приведены на рис. 3.

Избыточная температура на наружной поверхности ограждения здания определится из выражения

$$\vartheta_{\text{п1}}^{\text{max}} = T_{\text{п1}}^{\text{max}} - T_{\text{п1}}^* = T_{\text{п1}}^* - T_{\text{п1}}^{\text{min}} = 0,5(T_{\text{п1}}^{\text{max}} - T_{\text{п1}}^{\text{min}}) \quad (13)$$



а) зимний режим $T_{n1}^* < T_{n2}$; б) летний и переходный режим $T_{n1}^* \approx T_{n2}$;
в) жаркий летний режим $T_{n1}^* > T_{n2}$;

Рисунок 3 - Распределение температуры и удельного теплового потока по толщине ограждения здания при гармоническом изменении температуры снаружи

T_{n1} - температура наружной поверхности, К;

T_{n2} - температура внутренней поверхности, К;

T_x^* - температура между максимальным и минимальным отклонением (средняя) по сечению ограждения, К;

q_n - удельный тепловой поток, Вт/м ;

λ - коэффициент теплопроводности материала ограждения, Вт/(м·К);

α - коэффициент температуропроводности материала ограждения, м²/с;

ср - объемная теплоемкость ограждения, кДж/(м³·К);

δ - толщина стены ограждения здания, м.

Причем, возможно три случая, когда $T_{n1}^* < T_{n2}$ (зимний режим), $T_{n1}^* \approx T_{n2}$ (летний и переходный режим), $T_{n1}^* > T_{n2}$ (жаркий летний режим).

Распределение амплитуды температурной волны по сечению ограждения имеет вид

$$\vartheta_x = \vartheta_{n1}^{\max} \cdot e^{-kx} \quad (14)$$

Распределение колебаний температуры по сечению ограждения, относительно средней T_x^* температуры определится из выражения

$$T_x = T_x^* \pm \vartheta_{n1}^{\max} \cdot e^{-kx}, \quad (15)$$

где k - коэффициент, определяемый по формуле (10).

Удельный тепловой поток на наружной поверхности ограждения здания в случае «а» (рис. 3), который чаще всего встречается в зимний период эксплуатации здания определится из выражения

$$q_n = -\lambda \left(\frac{dT_x}{dx} \right)_{x=0} = q_{n1}^* + \lambda \cdot \vartheta_{n1}^{\max} \cdot k \quad (16)$$

где $q_{п1}^*$ — среднее значение теплового потока на наружной поверхности ограждения, Вт/м².

Удельный тепловой поток на наружной поверхности ограждения в случае «б» (рис.3), который встречается в переходный и летний периоды эксплуатации здания, определится из выражения

$$q_{п} = \lambda \cdot \vartheta_{п1}^{\max} \cdot k - q_{п1}^* \quad (17)$$

Удельный тепловой поток на наружной поверхности ограждения в случае «в» (рис. 3), который встречается в жаркий летний режим эксплуатации здания определится из выражения

$$q_{п} = 0,5 \cdot \lambda \cdot \vartheta_{п1}^{\max} \cdot k \quad (18)$$

В жаркий период ограждение здания нагревается в «дневные» часы до температур выше, чем внутренняя температура ограждения (помещения), а в остальные «ночные» часы теплота от ограждения здания равномерно передается как наружу, так и внутрь помещения.

4 вариант: квазистационарный тепловой режим, когда температуры на наружной и внутренней поверхностях ограждения изменяются по гармоническому закону.

Тепловое одновременное воздействие на ограждения здания всех трех предыдущих случаев формулируется так: тепловой поток на поверхности ограждения после всех температурных возмущений равен сумме первоначального теплового потока и всех потоков, вызванных гармоническими колебаниями на внешней и внутренней поверхности ограждения здания.

Таким образом, для различных вариантов эксплуатации, определены распределения температур и удельных тепловых потоков при гармоническом подводе теплоты как к наружной, так и ко внутренней поверхностям ограждения здания, что обеспечивает возможность проводить мониторинг теплофизических свойств материалов ограждений по значениям температур и тепловых потоков на их поверхностях методом неразрушающего контроля [6].

Список литературы

1. СП 50.13330.2024. Свод правил. Тепловая защита зданий. – Москва: ФГУП ЦПП, 2024. 118 с.
2. Богословский В. Н. Тепловой режим здания. М.: Стройиздат, 1979. – 248 с.
3. Богословский В. Н. Строительная теплофизика. М.: Высшая школа. 1982. -415 с.
4. Иванов В.В. Карасева Л.В., Тихомиров С.А. Нестационарный теплоперенос в многослойных строительных конструкциях. // Известия вузов. Строительство. -2001. №9-10. С. 7—10.
5. Иванов В.В., Карасева Л.В., Сохно И.И. Исследование процессов радиационно-конвективного прогрева ограждающих конструкций. // Известия вузов Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2003. - №3.
6. Ковылин А. В., Фокин В. М. Методика определения коэффициентов теплопроводности, теплоусвоения, тепловой инерции, температуропроводности и объемной теплоемкости строительных и теплоизоляционных материалов методом неразрушающего контроля //Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Строительство и архитектура. Волгоград : ВолгГАСУ, 2010. Вып.19 (38). С. 112—117.

УДК 691.32

Золотухина Наталья Викторовна,
ст. преп. каф. архитектуры и дизайна;
Раецкий Петр Тимофеевич,
студент магистратуры 1 курс,
БПИ ГОУ «ПГУ им. Т.Г. Шевченко»

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ МОДИФИКАЦИИ БЕТОНА НА ОСНОВЕ КАРБОНАТНЫХ МИКРОНАПОЛНИТЕЛЕЙ

В данной статье рассмотрены ресурсосберегающие подходы к модификации бетонных композитов с применением карбонатных микронаполнителей. Обоснована целесообразность использования тонкодисперсных карбонатных материалов в качестве структурообразующего и оптимизирующего компонента бетонных смесей. Показано, что введение микронаполнителей позволяет снизить удельный расход цемента, повысить энергоэффективность строительных конструкций и уменьшить экологическую нагрузку на окружающую среду. Особое внимание уделено механизмам влияния карбонатных частиц на формирование структуры цементного камня и эксплуатационные свойства бетона. Сделан вывод о перспективности применения данных технологий в рамках концепции устойчивого развития строительной отрасли.

Ключевые слова: бетонные композиты, карбонатные микронаполнители, ресурсосбережение, энергоэффективность, экологическая безопасность, устойчивое строительство.

Современный этап развития строительной индустрии характеризуется переходом от экстенсивного использования природных ресурсов к внедрению технологий, ориентированных на снижение материальных и энергетических затрат. Производство бетона, являющегося одним из наиболее массовых строительных материалов, оказывает значительное воздействие на экологическую обстановку и требует существенных энергетических ресурсов, прежде всего на стадии изготовления цемента.

В условиях ужесточения требований к энергоэффективности зданий и экологичности строительных материалов возрастает интерес к модифицированным бетонным композициям, позволяющим обеспечить заданные прочностные и эксплуатационные характеристики при сниженной материалоемкости. Одним из перспективных направлений в данной области является применение минеральных микронаполнителей карбонатной природы, обладающих высокой доступностью и технологической совместимостью с цементными системами.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является анализ и обоснование эффективности ресурсосберегающих технологий модификации бетона на основе применения карбонатных микронаполнителей.

Для достижения поставленной цели в статье определены следующие задачи:

- раскрыть сущность ресурсосберегающего подхода при производстве бетонных композитов;
- исследовать влияние карбонатных микронаполнителей на процессы структурообразования цементного камня;
- оценить энергетические и экологические эффекты от снижения расхода цемента;
- определить перспективы применения карбонатных микронаполнителей в современном строительстве.

Ресурсосбережение как приоритет современного бетонного производства. Ресурсосбережение в строительстве предполагает рациональное использование минерального сырья, снижение объёма первичных ресурсов и повышение эффективности уже применяемых

материалов. В бетонных технологиях данный подход реализуется за счёт оптимизации состава смеси, внедрения минеральных добавок и повышения плотности и долговечности материала.

Снижение расхода цемента без ухудшения прочностных показателей бетона является ключевой задачей ресурсосберегающих технологий, о чем пишут в своих трудах Баженов Ю. М. и Коротких Д. Н. [1, 2]. Это обусловлено тем, что производство цемента связано с высокими энергозатратами и значительными выбросами диоксида углерода [3]. Введение карбонатных микронаполнителей позволяет частично заместить цементный клинкер и тем самым сократить совокупные энергетические и экологические издержки [4].

Ресурсосберегающая стратегия в технологии бетонных композитов с карбонатным микронаполнителем основана на принципе рационального перераспределения материальных и энергетических потоков внутри производственного цикла. Её ключевая идея заключается не просто в замене части цемента минеральным порошком, а в целенаправленном формировании оптимальной микроструктуры цементного камня при одновременном снижении затрат сырья, энергии и природных ресурсов.

Карбонатный микронаполнитель представляет собой тонкоизмельчённый порошок известняковых или доломитовых пород с высокой удельной поверхностью. В составе бетонной смеси он выполняет многофункциональную роль. Прежде всего, частицы микроразмера заполняют межзерновые пустоты между зёрнами цемента и мелкого заполнителя, обеспечивая более плотную упаковку твёрдой фазы. Такой эффект «микроуплотнения» позволяет сократить объём порового пространства и уменьшить потребность в избыточной воде затворения. В результате формируется более компактная и равномерная структура цементного камня.

С позиций экономии ресурсов особое значение имеет снижение доли клинкерной составляющей. Производство цемента относится к числу наиболее энергоёмких процессов строительной индустрии и сопровождается значительными выбросами углекислого газа. Замещение части цемента карбонатным микронаполнителем уменьшает потребление топлива и сырья для обжига клинкера, тем самым снижая себестоимость и экологическую нагрузку. При правильно подобранной дисперсности порошка сохраняется требуемая прочность, а в ряде случаев улучшаются ранние прочностные показатели за счёт ускорения кристаллизационных процессов.

Дополнительный ресурсосберегающий эффект достигается через использование местных карбонатных пород или отходов камнедробления и камнеобработки. Вовлечение таких материалов в производство бетонных смесей сокращает объём техногенных отходов и уменьшает транспортные издержки. Таким образом, реализуется принцип территориальной рациональности — использование сырья, доступного в непосредственной близости к строительной площадке или предприятию.

Технологическая составляющая подхода предполагает оптимизацию гранулометрического состава твёрдых компонентов, применение пластифицирующих добавок и корректировку водоцементного отношения. Расчёт плотной упаковки частиц позволяет добиться максимального заполнения объёма смеси твёрдой фазой при минимальном расходе вяжущего. Это ведёт к уменьшению усадочных деформаций, снижению проницаемости и повышению долговечности материала. Продление срока службы конструкций рассматривается как косвенная, но значимая форма ресурсосбережения, поскольку сокращается потребность в ремонтах и реконструкциях.

Следует отметить и структурно-химический аспект. Карбонатные частицы создают дополнительные центры кристаллизации гидратных новообразований, способствуя более равномерному распределению продуктов гидратации. За счёт этого повышается однородность цементного камня и уменьшается вероятность образования дефектных зон. Повышенная плотность структуры положительно влияет на морозостойкость и водонепроницаемость, что особенно важно при эксплуатации конструкций в неблагоприятных климатических условиях.

В обобщённом виде сущность ресурсосберегающего подхода заключается в переходе от экстенсивного увеличения расхода цемента к интеллектуальной оптимизации состава

бетонного композита. Карбонатный микронаполнитель становится инструментом управления структурой материала на микроуровне, обеспечивая снижение материалоемкости, уменьшение энергетических затрат и повышение эксплуатационной надёжности. Таким образом, достигается баланс между экономической эффективностью, технологической целесообразностью и экологической ответственностью современного строительства.

Характеристика карбонатных микронаполнителей. Карбонатные микронаполнители представляют собой тонкоизмельчённые минеральные материалы, основу которых составляют кальцит и доломит, более точный химический состав карбонатных пород представлен в работе [5]. Источниками их получения могут служить как природные породы, так и отходы горнодобывающей и камнеобрабатывающей промышленности.

Благодаря малому размеру частиц и развитой удельной поверхности микронаполнители эффективно включаются в цементную матрицу, формируя плотную пространственную структуру. Их химическая инертность по отношению к основным продуктам гидратации цемента обеспечивает стабильность свойств бетона во времени, а физическое воздействие на микроструктуру способствует улучшению эксплуатационных характеристик.

Механизмы влияния микронаполнителей на структуру бетона. Введение карбонатных микронаполнителей оказывает комплексное влияние на процессы формирования цементного камня. Частицы микронаполнителя заполняют межзерновое пространство между более крупными компонентами смеси, снижая объём капиллярных пор и повышая плотность структуры. Кроме того, карбонатные микронаполнители выполняют функцию центров кристаллизации, способствуя более равномерному распределению гидратных новообразований. Это приводит к формированию мелкопористой структуры, повышению ранней и проектной прочности, а также снижению усадочных деформаций бетона.

Научные исследования, посвящённые воздействию карбонатных микронаполнителей на процессы формирования структуры цементного камня, направлены на выявление механизмов их участия в гидратации и пространственной организации твердеющей системы [6-10 и др.]. В центре внимания находится не только эффект механического уплотнения, но и тонкие физико-химические взаимодействия между частицами карбоната кальция и продуктами гидратации цемента.

Экспериментальные работы [6 и др.] показывают, что введение тонкодисперсных карбонатных порошков существенно влияет на кинетику начальных стадий твердения. Благодаря высокой удельной поверхности частицы микронаполнителя выступают в роли дополнительных центров зародышеобразования гидратных фаз. Это ускоряет формирование гидросиликатов кальция и способствует более равномерному распределению новообразований по объёму цементного теста. В результате структура цементного камня формируется менее хаотично, а переход от пластического состояния к твёрдому происходит более организованно.

Рентгенофазовый анализ и термогравиметрические исследования подтверждают, что в присутствии карбонатных частиц изменяется количественное соотношение гидратных соединений. Отмечается перераспределение гидроксида кальция и образование дополнительных карбонатсодержащих фаз, способствующих уплотнению структуры. Такие преобразования отражаются на поровом пространстве: уменьшается объём крупных капиллярных пор, а доля мелкодисперсных пор возрастает, что свидетельствует о формировании более компактного цементного матрикса.

Сканирующая электронная микроскопия позволяет детально проследить морфологию контактных зон «микронаполнитель – цементный камень». Установлено, что вокруг карбонатных частиц формируется плотный слой гидратных новообразований, обеспечивающий прочную адгезию и повышение однородности структуры. Таким образом, микронаполнитель выполняет двойную функцию: с одной стороны — заполняет пустоты между зёрнами вяжущего, с другой — активно участвует в структурной организации гидратной системы.

Особое внимание уделяется гранулометрическому составу карбонатного порошка. Исследования показывают, что эффективность его применения напрямую зависит от дисперсности и соотношения с цементом. Оптимально подобранный фракционный состав обеспечивает максимальный эффект плотной упаковки частиц, снижая потребность в воде и способствуя формированию более плотной контактной структуры. При избыточном количестве микронаполнителя возможен обратный эффект — снижение прочности из-за уменьшения доли активного вяжущего компонента [10].

Методы низкотемпературной адсорбции и порометрии демонстрируют, что карбонатные микронаполнители влияют не только на общую пористость, но и на распределение пор по размерам. Сдвиг порового спектра в сторону микропор уменьшает проницаемость цементного камня и повышает его стойкость к замораживанию, водонасыщению и воздействию агрессивных сред. Это подтверждает тесную взаимосвязь между микроструктурой и эксплуатационными характеристиками бетона.

Современные исследования всё чаще дополняются компьютерным моделированием, позволяющим прогнозировать процессы структурообразования с учётом формы и размеров частиц. Такие подходы дают возможность заранее оценить влияние карбонатного микронаполнителя на пространственную организацию системы и подобрать оптимальную рецептуру.

Таким образом, совокупность экспериментальных и теоретических работ подтверждает, что карбонатные микронаполнители являются не просто инертными добавками, а активными элементами управления структурой цементного камня. Их применение позволяет целенаправленно регулировать кинетику гидратации, характер порообразования и плотность цементного матрикса, что создаёт основу для получения более прочных, долговечных и технологичных бетонных композитов.

Использование карбонатных микронаполнителей отвечает принципам устойчивого развития и экологической ответственности на что напрямую указывает автор в работе [11]. Снижение объёма цементного клинкера в составе бетона способствует уменьшению выбросов парниковых газов и сокращению потребления невозобновляемых природных ресурсов.

Оценка энергетического и экологического эффекта от сокращения расхода цемента при введении карбонатных микронаполнителей базируется на анализе жизненного цикла материала, сравнении удельной энергоёмкости компонентов и расчёте сопутствующих выбросов парниковых газов. Такой подход позволяет количественно обосновать ресурсосберегающую целесообразность модификации бетонных составов. Данный подход будет применен в научной магистерской работе Раецкого П. Т.

Цемент является наиболее энергоёмкой составляющей бетонной смеси. Его производство включает добычу сырья, помол, обжиг клинкера при высоких температурах и последующее измельчение, что сопровождается значительным потреблением топлива и электроэнергии. Кроме того, в процессе декарбонизации известняка выделяется углекислый газ. Следовательно, уменьшение доли цемента в рецептуре напрямую отражается на снижении совокупных энергетических затрат и объёма выбросов CO_2 на единицу продукции.

Карбонатные микронаполнители, напротив, требуют значительно меньших затрат энергии, поскольку их получение ограничивается добычей и тонким помолом без высокотемпературного обжига. При замещении части цемента таким порошком удельная энергоёмкость одного кубического метра бетона уменьшается пропорционально доле замещения. Для оценки эффекта обычно рассчитывают разницу между энергозатратами на производство эквивалентной массы цемента и микронаполнителя. Полученная величина отражает экономию первичных энергоресурсов.

Экологическая составляющая анализа включает определение снижения углеродного следа. Расчёт производится путём умножения массы сокращённого цемента на удельный коэффициент выбросов CO_2 , характерный для его производства. Далее учитываются выбросы, связанные с получением и транспортировкой карбонатного порошка. Разность этих

показателей демонстрирует чистый экологический выигрыш. В случае использования местного сырья и минимизации транспортных расходов, экологический эффект усиливается.

Дополнительный вклад в общий результат даёт повышение долговечности бетона. Более плотная структура цементного камня, формируемая при оптимальном введении микронаполнителя, уменьшает проницаемость и повышает стойкость к агрессивным воздействиям. Продление срока службы конструкций снижает потребность в ремонтах и реконструкциях, что косвенно сокращает расход материалов и энергии в долгосрочной перспективе. Таким образом, экологический эффект проявляется не только на стадии производства, но и на этапе эксплуатации.

Оценка также может учитывать экономию природных ресурсов, выраженную в снижении объёма добычи сырья для клинкера. Переход к более рациональному использованию минеральных компонентов способствует уменьшению техногенной нагрузки на окружающую среду и снижению масштабов промышленной переработки карбонатных пород для обжига.

Комплексная методика расчёта включает сопоставление традиционного и модифицированного состава бетона по следующим показателям: удельная энергоёмкость, масса выбросов CO_2 , расход природного сырья и прогнозируемый срок службы конструкции. На основе этих данных формируется интегральный показатель эффективности, позволяющий оценить целесообразность внедрения карбонатных микронаполнителей в конкретных производственных условиях.

Таким образом, снижение расхода цемента при использовании карбонатных микронаполнителей обеспечивает двойной эффект — уменьшение прямых энергетических затрат и сокращение углеродного следа строительной продукции. В совокупности с повышением долговечности конструкций это формирует устойчивую модель производства бетона, ориентированную на рациональное использование ресурсов и экологическую безопасность строительной отрасли.

Перспективы применения карбонатных микронаполнителей в современном строительстве определяются совокупностью технологических, экономических и экологических факторов, формирующих новые требования к качеству и устойчивости строительных материалов. В условиях ужесточения норм по энергосбережению и снижению углеродного следа возрастает роль минеральных добавок, способных обеспечить требуемые эксплуатационные характеристики при уменьшении расхода клинкерной составляющей.

Одним из ключевых направлений является производство цементосодержащих композитов пониженной материалоемкости. Тонкодисперсные карбонатные порошки позволяют оптимизировать гранулометрический состав системы «вяжущее — заполнитель», повышая плотность упаковки частиц. Это создаёт предпосылки для снижения водоцементного отношения и формирования более однородной структуры цементного камня. В результате открываются возможности для выпуска высокопрочных и долговечных бетонов с уменьшенной долей цемента без потери несущей способности.

Существенные перспективы связаны с развитием технологий самоуплотняющихся и высокотекучих смесей. Карбонатные микронаполнители стабилизируют реологические свойства бетонной массы, уменьшают склонность к расслаиванию и водоотделению. Это особенно актуально при возведении монолитных железобетонных конструкций сложной конфигурации, где требуется высокая подвижность смеси при сохранении структурной устойчивости.

Перспективным направлением является применение карбонатных порошков в составе сухих строительных смесей: клеевых, штукатурных и ремонтных составов. Их использование способствует улучшению пластичности, адгезии и трещиностойкости покрытий. При этом достигается экономия дорогостоящих вяжущих компонентов, что повышает конкурентоспособность продукции.

Особое значение имеет экологический аспект. Карбонатные микронаполнители могут производиться из местных известняков, доломитов и отходов камнеобработки [11].

Вовлечение вторичных минеральных ресурсов снижает нагрузку на природные месторождения и уменьшает объём строительных отходов. Сокращение доли цемента в композиции напрямую связано с уменьшением выбросов CO₂, что соответствует глобальным тенденциям декарбонизации строительной отрасли.

В перспективе ожидается интеграция карбонатных микронаполнителей в технологии композиционных вяжущих нового поколения, где они будут использоваться совместно с активными минеральными добавками и химическими модификаторами. Такой синергетический подход позволит управлять процессами гидратации и формированием микроструктуры на ранних стадиях твердения. Это открывает возможности для создания бетонов с заданными свойствами — повышенной морозостойкостью, водонепроницаемостью и стойкостью к агрессивным средам.

Кроме того, развитие цифровых методов проектирования составов бетона и моделирования плотной упаковки частиц расширяет потенциал рационального применения карбонатных порошков. Точное дозирование и подбор дисперсности обеспечивают прогнозируемость свойств материала и минимизацию перерасхода компонентов.

Таким образом, перспективы использования карбонатных микронаполнителей связаны с переходом к более устойчивым, экономичным и технологически управляемым системам строительных материалов. Их внедрение способствует снижению материалоёмкости, повышению долговечности конструкций и формированию экологически ориентированной модели развития строительной индустрии [2].

Ресурсосберегающие технологии модификации бетона с использованием карбонатных микронаполнителей представляют собой эффективное и перспективное направление развития строительных материалов. Их применение позволяет оптимизировать состав бетонных смесей, повысить энергоэффективность конструкций и снизить негативное воздействие на окружающую среду. Комплексное влияние микронаполнителей на структурные и эксплуатационные свойства бетона обосновывает целесообразность их широкого внедрения в практику современного строительства.

Список литературы

1. Баженов Ю.М., Демьянова В.С. Модифицированные высококачественные бетоны. Научное издание. – М.: Изд-во АСВ, 2006. – 368 с.
2. Коротких Д.Н. Повышение прочности и трещиностойкости структуры современных цементных бетонов: проблемы материаловедения и технологии. - дисс. ... д.т.н. 05.23.05. – Воронеж, 2014. - 354 с.
3. Золотухина Н. В. Модифицированные бетоны в современном строительстве. Сборник X Республ научно-практич. конфер. БПФ ГОУ ПГУ им. Т.Г. Шевченко. 2019. С. 10-14.
4. Золотухина Н. В., Использование техногенных отходов в строительном производстве // Научно-практический журнал. «Устойчивое развитие науки и образования» №3 (30) г. Воронеж, 2019 г. с. 266-272
5. Золотухина Н. В., Лукутцова Н. П., Использование отходов камнепиления как микронаполнителя в бетоны // Сборник материалов XI Республиканской научно-практической конференции (с международным участием), 2019 г., г. Бендеры, с.303-307
6. Свищ, И. С. Влияние вида карбонатных отходов на прочность шлакощелочного бетона на основе жидкого стекла с силикатным модулем 1,5...1,7 после ТВО / И. С. Свищ, Е. В. Носатова // Строительство и техногенная безопасность. – 2014. – № 49. – С. 49-52. – EDN VMKDSZ.
7. Петропавловская, В. Б. Модифицированные карбонатные композиты на основе местного сырья / В. Б. Петропавловская, Т. Б. Новиченкова, К. С. Петропавловский // Объектно-пространственное проектирование уникальных зданий и сооружений : СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ I научно-практического форума «SMARTBUILD», к 100-летию строительного образования в Ивановской области и создания инженерно-строительного

факультета Иваново-Вознесенского политехнического института, Иваново, 23–24 ноября 2018 года. – Иваново: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный политехнический университет», 2018. – С. 157-161. – EDN XWYZIC.

8. Зверев, Е. А. Опыт применения карбонатных отходов южно-чусовского карьера / Е. А. Зверев, В. А. Голубев // Master's Journal. – 2013. – № 1. – С. 210-216. – EDN QCNPCB.

9. Патент № 2494056 С2 Российская Федерация, МПК C04B 2/12. Способ получения строительных материалов из карбонатных отходов камнедробления: № 2011154454/03 : заявл. 29.12.2011; опубл. 27.09.2013 / Д. К. С. Батаев, Х. Н. Мажиев, В. А. Р. Иноркаев [и др.] ; заявитель Учреждение Российской академии наук Комплексный научно-исследовательский институт РАН, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова" (ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова). – EDN NNVGUB.

10. Золотухина, Н. В. Исследование влияния тонкодисперсного карбонатного микронаполнителя на прочностные свойства мелкозернистого бетона / Золотухина Н. В., Лукутцова Н. П., Боровик Е. Г. // Материалы междунауч.-практ. конференции «Инновации в строительстве-2019» БГИТУ, 2019 с. 69-75

11. Золотухина, Н. В., Лукутцова, Н. П., Перспективы использования техногенных отходов Молдовы в производстве строительных материалов // Сборник научных трудов национальной конференции "Актуальные вопросы техники, науки, технологий" «БГИТУ» г. Брянск. 2019 г. с.334-337

УДК 699.86

Золотухина Наталья Викторовна,
ст. преп. каф. архитектуры и дизайна,
БПИ ПГУ им. Т.Г. Шевченко;
Дудник Анна Вячеславовна
ст. преп. каф. строительные
технологии и инженерно-экологические,
системы БПИ ПГУ им. Т.Г. Шевченко
(аспирант ФГБОУ ВО «БГИТУ» г. Брянск, РФ)

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЖИЛОГО ДОМА НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В статье рассматриваются проектные решения, направленные на повышение энергетической эффективности индивидуального жилого дома на этапе разработки архитектурно-строительной концепции. Обоснована значимость раннего учета теплотехнических, объемно-планировочных и инженерных факторов, определяющих уровень энергопотребления здания в процессе эксплуатации. Проанализированы методы оптимизации формы здания, ориентации по сторонам света, теплозащиты ограждающих конструкций, а также интеграции энергоэффективных инженерных систем. Показано, что именно стадия проектирования является ключевым этапом, на котором формируются предпосылки для снижения теплопотерь, сокращения эксплуатационных затрат и уменьшения экологической нагрузки. Сделан вывод о необходимости комплексного подхода к проектированию энергоэффективного индивидуального жилья с учетом климатических, экономических и нормативных факторов.

Ключевые слова: энергетическая эффективность; индивидуальный жилой дом; проектирование; теплопотери; ограждающие конструкции; энергосбережение; инженерные системы; устойчивое строительство; теплотехнический расчёт; климатические условия, устойчивое строительство.

Рост стоимости энергоресурсов, ужесточение нормативных требований к теплозащите зданий и глобальные тенденции снижения выбросов парниковых газов формируют новые ориентиры в жилищном строительстве. Индивидуальные жилые дома, составляющие значительную долю малоэтажной застройки, характеризуются сравнительно высокой удельной энергоёмкостью вследствие значительной площади наружных ограждающих конструкций и автономных систем отопления.

Практика показывает, что до 60–70 % тепловых потерь здания закладывается уже на стадии архитектурного и конструктивного проектирования. Ошибки в выборе объемно-планировочных решений, недостаточная толщина утеплителя или нерациональная ориентация здания по сторонам света впоследствии приводят к увеличению эксплуатационных расходов и снижению комфортности проживания. В этой связи повышение энергетической эффективности именно на этапе проектирования является наиболее экономически обоснованным и технически эффективным направлением совершенствования индивидуального жилищного строительства.

Цель исследования. Разработка и обоснование комплекса проектных решений, обеспечивающих снижение энергетических затрат индивидуального жилого дома на стадии проектирования.

Задачи исследования: проанализировать факторы, влияющие на энергопотребление индивидуального жилого дома; определить роль архитектурно-планировочных решений в формировании теплового баланса здания; оценить влияние теплозащитных характеристик ограждающих конструкций на снижение теплопотерь; рассмотреть возможности интеграции

энергоэффективных инженерных систем на раннем этапе проектирования; сформулировать рекомендации по комплексному проектированию энергоэффективного жилого дома.

Современное развитие жилищного строительства характеризуется возрастающими требованиями к снижению эксплуатационных расходов и рациональному использованию топливно-энергетических ресурсов. В условиях роста тарифов на энергоснабжение и ужесточения нормативов по теплозащите зданий особую значимость приобретает проектирование энергоэффективных индивидуальных жилых домов. Практика эксплуатации показывает, что основная часть теплопотерь формируется вследствие конструктивных и архитектурных решений, принятых на ранних стадиях разработки проекта. Исправление подобных просчетов на этапе эксплуатации требует значительных финансовых вложений и часто технически затруднительно. Следовательно, именно стадия проектирования является ключевым резервом энергосбережения.

В работе рассматривается проектирование индивидуального жилого дома в с. Сукля ПМР по пер. Вишневый (рисунок 1). Для климатических условий Приднестровского региона характерен умеренно-континентальный климат с продолжительным отопительным периодом (до 180 суток) и значительным перепадом температур между зимним и летним сезонами. При отсутствии рациональной теплозащиты индивидуальные жилые дома демонстрируют повышенное удельное энергопотребление.



Рисунок 1 - Проект индивидуального жилого дома в с. Сукля (студент Онищенко С. И., руководитель старший преподаватель Золотухина Н.В.): а – фасады здания; б – планы этажей здания

Повышение энергетической эффективности на стадии проектирования позволяет: сократить потребление тепловой энергии; уменьшить эксплуатационные расходы; снизить выбросы углекислого газа; обеспечить стабильные параметры микроклимата помещений. При проектировании необходимо на стадии концепции здания учитывать проектные и конструктивные решения, влияющие на повышение энергоэффективности объекта. Рассмотрим пошагово данные концептуальные аспекты.

1. Формирование энергоэффективной концепции здания.

Энергетическая эффективность индивидуального жилого дома должна рассматриваться как системное свойство, формируемое совокупностью архитектурных, конструктивных и инженерных решений. На этапе проектирования определяется компактность объема здания, коэффициент остекления фасадов, конфигурация кровли и цокольной части. Чем меньше отношение площади ограждающих конструкций к внутреннему объему, тем ниже потенциальные теплотери. Компактные формы (близкие к кубу или параллелепипеду) обеспечивают более рациональное распределение тепловых потоков. Данные характеристики были предусмотрены в рассматриваемом жилом доме (рисунок 2, а).

Проектирование жилого дома в с. Сукля с выполнением архитектурно-строительных чертежей проводилось в полном соответствии с действующими нормативами ПМР [1-17]. Участок под строительство проектом был предусмотрен на свободном участке по пер. Вишневый с. Сукля, который не используется на протяжении многих лет (рисунок 2, б). Участок от застройки свободен, инженерные сети на площади участка не проходят.

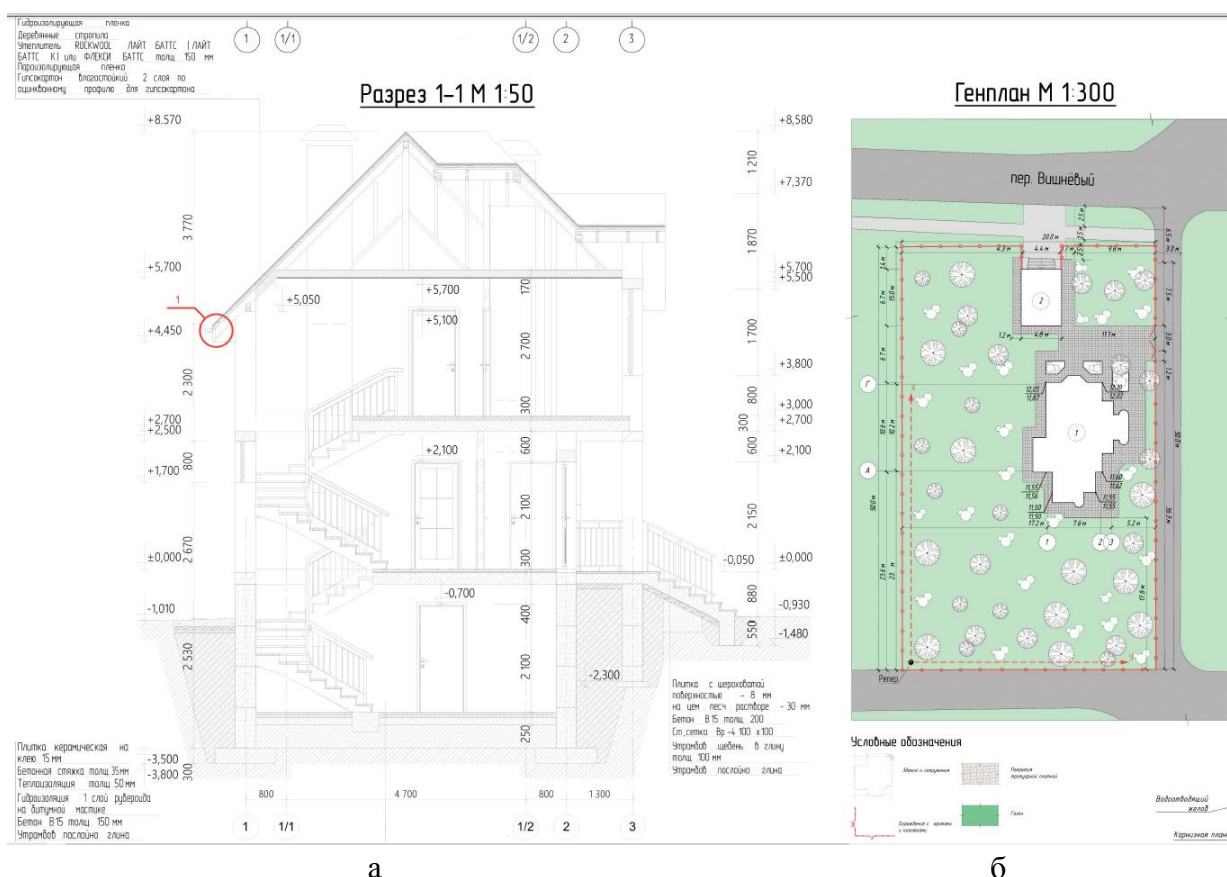


Рисунок 2 - Проект индивидуального жилого дома в с. Сукля (студент Онищенко С. И., руководитель старший преподаватель Золотухина Н.В.): а – разрез 1-1 здания; б – генеральный план проектирования здания

В горизонтальном и вертикальном отношении посадка проектируемого здания решена с учётом существующей застройки. Рядом с участком проходят сети газо-, водоснабжения, телефонная линия и линия воздушного электрического кабеля. Площадь участка 1500 м².

Вертикальная планировка участка решена с учетом существующего рельефа. Отвод атмосферной влаги предусмотрен на газоны. Свободная от застройки территория максимально озеленяется. Запроектированные подъезды к зданию обеспечивают нормальное транспортное обслуживание проектируемого объекта в соответствии с требованиями [5, 10].

2. Ориентация здания и использование пассивной солнечной энергии

Рациональная ориентация дома по сторонам света позволяет частично компенсировать теплопотери за счёт солнечных теплопритоков. Размещение основных жилых помещений с южной стороны способствует естественному нагреву в холодный период года, тогда как северный фасад целесообразно использовать для размещения вспомогательных помещений с минимальным остеклением.

Применение принципов пассивной солнечной архитектуры позволяет снизить потребность в искусственном отоплении без существенных дополнительных затрат. При этом важно предусматривать защиту от перегрева в тёплый период года с помощью навесов, козырьков и регулируемых солнцезащитных элементов.

Расположение и ориентация рассматриваемого объекта на участке выполнена с соблюдением требований [4, 5, 9] к ориентации и инсоляции помещений. Инженерные сети решены в подземном варианте. Техничко-экономические показатели по зданию: площадь застройки здания – 111,3 м²; строительный объем надземной части здания – 471,3 м³; строительный объем подземной части здания – 204 м³; общая площадь дома – 189,5 м². Здание жилого дома запроектировано одним прямоугольным объемом в плане (рис. 1). Размеры здания в осях А-Г×1-2 = 10,2×6,3 м. По проекту жилой дом 2-х этажный с подвалом, высота этажей 3,0 м, высота подвального помещения 2,8 м. Для вертикального сообщения между этажами в доме предусмотрена лестница. Проектом предусмотрены два входа в дом: парадный вход и вход через гостиную. В подвальное помещение предусмотрен спуск с лестницы из дома, а также вход с улицы.

По проекту в жилом доме предусмотрена сетевая солнечная электростанция (On-Grid). On-Grid – это система солнечной генерации, подключённая к общей электрической сети без использования аккумуляторов. Она позволяет использовать солнечную энергию в доме и при избытке передавать её в сеть. Преимущества On-Grid системы:

- + Экономия на электричестве;
- + Снижение или полное обнуление счетов за электроэнергию;
- + Отсутствие затрат на аккумуляторы - аккумуляторные батареи дороги и требуют обслуживания, а On-Grid работает без них;
- + Монетизация излишков энергии - возможность продажи избыточной электроэнергии по "зелёному тарифу";
- + Автоматическая синхронизация с сетью - нет необходимости вручную управлять подачей энергии;
- + Минимальные затраты на обслуживание - достаточно периодической чистки панелей и проверки соединений;
- + Долговечность системы - солнечные панели служат 25+ лет, инверторы – 10-15 лет.

3. Теплозащита ограждающих конструкций.

Одним из ключевых факторов энергосбережения является повышение сопротивления теплопередаче стен, перекрытий и покрытия. На стадии проектирования выполняется теплотехнический расчёт, позволяющий определить требуемую толщину утеплителя с учетом климатической зоны строительства.

Особое внимание уделяется устранению мостиков холода в узлах сопряжения конструкций: примыкания балконных плит, стыки стен и перекрытий, оконные проемы. Применение современных теплоизоляционных материалов с низкой теплопроводностью позволяет снизить удельные теплопотери без значительного увеличения толщины конструкций [18, 19].

Ограждающие конструкции подвергаются расчету по характеристикам термического сопротивления с выбором наиболее удовлетворяющих по всем показателям, позволяющим

поддерживать комфортную температуру внутри помещений в любое время года и значительно снижать затраты на содержание здания [20, с.265].

Сопrotивление теплопередаче ограждающих конструкций - один из важнейших теплотехнических показателей строительных материалов. При общих равных условиях, это отношение разности температур на поверхностях ограждающей конструкции к величине мощности теплового потока (теплопередача за один час через один квадратный метр площади поверхности ограждающей конструкции, проходящего сквозь нее). Сопrotивление теплопередаче отражает теплозащитные свойства ограждающей конструкции и складывается из термических сопротивлений отдельных однородных слоев конструкции [1, с.13].

«Сопrotивление теплопередаче ограждающей конструкции – это теплотехнический коэффициент, характеризующий уровень теплоизоляционных свойств ограждающих конструкций. Чем больше сопротивление теплопередаче конструкции, тем выше ее теплоизоляционные свойства, т.е. тем меньший тепловой поток, проходит через эту конструкцию, тем меньше потери тепла через нее» [1, с.14].

Основным требованием теплотехнического расчета ограждающих конструкций, регламентируемым [1], является то, что фактическое $R_{пр}$ конструкции не должно быть меньше сопротивления теплопередаче, обеспечивающего нормативное значение температурного перепада ΔT между температурой внутреннего воздуха t_v и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции T_v . Это санитарно-гигиеническое требование выражается условием

$$R_{пр} \geq n \cdot (t_v - t_n) / \Delta T \cdot \alpha_v, \quad (1)$$

где n - коэффициент, учитывающий зависимость положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху; t_n - расчетная температура наружного воздуха в холодный период года, °C [21]. Наружная температура воздуха в холодный период зависит от региона, где проектируется постройка объекта [8, 11].

Действующие нормы и правила [1, 8, 11] декларируют требования к тепловой защите зданий. Согласно СНиП ПМР 23-03-2011 "Тепловая защита зданий", тепловая защита зданий устанавливается «... в целях экономии энергии при обеспечении санитарно-гигиенических и оптимальных параметров микроклимата помещений и долговечности ограждающих конструкций зданий и сооружений» [1, с.4].

Нормы и правила [1, 8, 11] распространяются на тепловую защиту жилых, общественных, производственных, сельскохозяйственных и складских зданий и сооружений, в которых необходимо поддерживать определенную температуру и влажность внутреннего воздуха. В нормах устанавливают требования к следующим показателям: приведенному сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций зданий; ограничению температуры и недопущению конденсации влаги на внутренней поверхности ограждающей конструкции, исключая окна с вертикальным остеклением; удельному показателю расхода тепловой энергии на отопление здания; теплоустойчивости ограждающих конструкций в теплый период года и помещений зданий в холодный период года; воздухопроницаемости ограждающих конструкций и помещений зданий; защите от переувлажнения ограждающих конструкций; теплоусвоению поверхности полов; классификации, определению и повышению энергетической эффективности проектируемых и существующих зданий; контролю нормируемых показателей, включая энергетический паспорт здания [1].

Удовлетворению всех вышеперечисленных требований соответствует расчет требуемой толщины ограждающей конструкции и проверка по нормируемому значению сопротивления теплопередаче в программе «Теремок» 0.8.5 / 0118 Дмитрия Чигинского "Теплотехнический расчет многослойных ограждающих конструкций". В проектируемом жилом доме ограждающие конструкции подвергались расчету в программе «Теремок» 0.8.5 / 0118 Дмитрия Чигинского. Выбор утеплителя является многовариантной задачей при проектировании, при

которой необходимо анализировать и сравнивать различные материалы, отдавая предпочтение лучшим по большинству показателей [22].

Несущий остов рассматриваемого жилого дома – бескаркасный с продольно-поперечным расположением несущих каменных стен. Расчетная схема здания – связевая. Стены вместе с перекрытиями образуют пространственную каменную коробку, которая воспринимает все действующие на здание горизонтальные и вертикальные нагрузки и обеспечивает ему прочность и устойчивость (рисунок 1).

Перекрытие и покрытие – сборные пустотные железобетонные плиты с монолитными участками. Лестницы проектом приняты: внутренние деревянные по индивидуальному проекту, наружные из монолитного железобетона. Проектом приняты полы по грунту, по междуэтажным перекрытиям. По материалу приняты полы – керамические, паркетные. В подстилающих слоях напольных покрытий предусмотрена стяжка из монолитного полистиролбетона в качестве теплоизоляционного и шумоизоляционного слоев (рисунок 2).

Фундаменты – ленточные, лента из монолитного железобетона, стены сборные из ФБС. Поверхности стен подвала, соприкасающиеся с грунтом, утепляются плитами Пеноплекс толщиной 100 мм и гидроизолируются битумно-латексной мастикой Флексигум. Горизонтальная гидроизоляция из цементного раствора. По периметру здания устраивается бетонная отмостка шириной 1,0 метра с уклоном 2% от стены по щебеночному основанию, толщиной 100 мм (рисунок 2).

Наружные стены – несущие из блоков пильного известняка размерами 390x190x188 марки М 100 на растворе марки 75, толщиной 390 мм, класс по морозостойкости F25. Стены здания усилены армированием в соответствии с требованиями норматива [6]. Внутренняя отделка высококачественная штукатурными и гипсовыми шпаклевочными составами. Наружная отделка включает в себя утепление стен плитами экструзионного пенополистирола "Пеноплекс" тип 35 толщиной 50 мм, что подтверждается теплотехническим расчетом. Перегородки проектом приняты из кирпича марки М 75 на растворе марки 50, толщиной 120 мм. При входных группах парадного входа и террасы по проекту предусмотрено устройство колонн К1 и К2 из полнотелого кирпича с заливкой в пустоту бетона с предварительным армированием.

Проектирование кровельного покрытия проектом предусмотрено с учетом нормативных требований норм [2]. Крыша четырехскатная многоендовая. Вентиляция естественная через слуховые окна. Утеплитель над покрытием – минераловатные плиты ROCKWOOL Лайт Баттс толщиной 150 мм, что подтверждается теплотехническим расчетом. Несущие элементы кровли – наслонные деревянные стропила. Материал кровли – металлочерепица Монтерей. Водосток наружный организованный. Для предотвращения увлажнения теплоизоляционного слоя от паров, проникающих из помещений, под ним устраивается пароизоляция из пароизоляционной пленки, а над ним в кровельном покрытии гидроизоляционная пленка.

4. Энергоэффективные оконные системы.

Окна являются наиболее уязвимым элементом ограждающей оболочки. На этапе проектирования необходимо учитывать коэффициент теплопередачи стеклопакетов, герметичность монтажных швов и оптимальное соотношение площади остекления к площади фасада. Использование многокамерных профилей и энергосберегающих стекол с низкоэмиссионным покрытием существенно снижает тепловые потери.

По проекту в жилом доме приняты окна – двухкамерные стеклопакеты из металлопластиковых профилей. Двухкамерные стеклопакеты состоят из трех полотен стекла, которые установлены на расстоянии друг с другом, то есть, между тремя стеклами сформированы две герметичные камеры. Стандартная толщина стекла — 4 мм, наружные стекла могут толщиной 5 мм для повышения шумоизоляции и теплоизоляции. Двери проектом приняты – металлопластиковые и металлические.

Для климатических условий ПМР применение усиленной теплозащиты и энергоэффективных окон позволяет сократить тепловые потери почти на 40–45 %. При площади 189 м² экономия тепловой энергии может составлять порядка 14 000–16 000 кВт·ч за

отопительный сезон. Это приводит к снижению эксплуатационных расходов и уменьшению углеродного следа индивидуального жилого дома.

5. Инженерные системы и их интеграция.

Проектирование энергоэффективного дома невозможно без рационального выбора систем отопления, вентиляции и горячего водоснабжения. Предпочтение отдается низкотемпературным системам отопления (например, тёплым полам), обеспечивающим равномерное распределение тепла.

Важным элементом является организация приточно-вытяжной вентиляции с рекуперацией тепла. Такая система позволяет возвращать значительную часть тепловой энергии удаляемого воздуха и снижать затраты на отопление.

Дополнительно на стадии проектирования может предусматриваться использование возобновляемых источников энергии: солнечных коллекторов, фотоэлектрических панелей или тепловых насосов. Их интеграция наиболее эффективна именно при комплексной разработке проекта.

6. Экономическая и экологическая эффективность.

Повышение энергетической эффективности приводит к сокращению эксплуатационных расходов на отопление и кондиционирование. Несмотря на некоторое увеличение первоначальных инвестиций, срок окупаемости энергоэффективных решений является относительно коротким за счёт экономии энергоресурсов.

С экологической точки зрения снижение потребления топлива уменьшает выбросы углекислого газа и других загрязняющих веществ. Таким образом, проектирование энергоэффективного индивидуального дома способствует формированию устойчивой модели развития малоэтажного строительства.

В жилом доме в с. Суклея принята система отопления с конденсационным газовым котлом и тёплым электрическим полом в жилых помещениях дома. Проектом предусмотрена рекуперация тепла в вентиляции, данная система позволяют возвращать до 90% тепла из вытяжного воздуха.

В проектируемом доме предусмотрены "умные" технологии и управление энергопотреблением: автоматизированные системы управления отоплением – программируемые термостаты и умные контроллеры; энергосберегающие бытовые приборы (класс A+++) – снижают потребление электричества; светодиодное освещение – снижает энергопотребление в 8-10 раз по сравнению с лампами накаливания. Эти технологии позволяют значительно сократить затраты на отопление и электроэнергию, повышая комфорт и автономность дома.

Выводы.

Основной потенциал энергосбережения формируется на стадии архитектурно-строительного проектирования.

Компактность формы здания и рациональная ориентация по сторонам света существенно влияют на тепловой баланс.

Усиление теплозащиты ограждающих конструкций позволяет сократить теплопотери до 45 %.

Интеграция энергоэффективных инженерных систем усиливает общий эффект энергосбережения.

Для климатических условий ПМР применение энергоэффективных решений экономически оправдано.

Комплексный подход к проектированию обеспечивает одновременно экономическую и экологическую эффективность.

Заключение. Повышение энергетической эффективности индивидуального жилого дома на стадии проектирования является стратегически обоснованным направлением развития малоэтажного строительства. Рациональный выбор конструктивных и инженерных решений позволяет существенно сократить энергопотребление без ухудшения эксплуатационных характеристик здания. В условиях современных климатических и экономических вызовов

формирование энергоэффективной концепции дома должно рассматриваться как обязательный элемент профессионального проектирования.

Список литературы

1. СНиП ПМР 23-03-2011 "Тепловая защита зданий", издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2011 г., с.30
2. СП ПМР 31-126-2011 "Кровли зданий и сооружений. Проектирование и строительство", издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2011 г., с.142
3. СНиП ПМР 41-01-2011 "Отопление, вентиляция и кондиционирование", издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2011 г., с.86
4. СНиП ПМР 30-01-2010 "Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений", издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2010 г., с.94
5. СНиП ПМР 31-05-2010 «Здания жилые многоквартирные.ч.1»: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2010 г., с.37
6. СНиП ПМР 22-03-2009 "Строительство в сейсмических районах", издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2009 г., с.38
7. СНиП ПМР 51-09-2009 «Каменные и армокаменные конструкции», издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2009 г., с.62
8. СП ПМР 23-101-2004 «Проектирование тепловой защиты зданий», издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2011 г., с.54
9. СНиП ПМР 23-02-03 "Естественное и искусственное освещение", издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2003 г., с.54
10. СНиП ПМР 21-01-03 «Пожарная безопасность зданий и сооружений», издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2003 г., с.34
11. СНиП ПМР 23-01-02 "Строительная климатология и геофизика", издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2002 г., с.81
12. СНиП ПМР 30-06-02 "Благоустройство территории", издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2002 г., с.18
13. СНиП ПМР 52-05-02 «Несущие и ограждающие конструкции», издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2002 г., с.115
14. СНиП ПМР 31-02-02 "Полы", издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2002 г., с.17
15. СНиП ПМР 31-19-02 «Изоляционные и отделочные покрытия», издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2002 г., с.43
16. СНиП ПМР 20-03-02 "Защита строительных конструкций от коррозии", издательство: ГОУ ПМР
17. СНиП ПМР 50-04-02 "Земляные сооружения основания и фундаменты", издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2002 г., с.77
18. СНиП ПМР 52-01-02 «Бетонные и железобетонные конструкции», издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2002 г., с.127
19. Виды и характеристики современных утеплителей. Электронный ресурс URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6164 (дата обращения 12.01.2026 г.)
20. Инновации теплоизоляционных материалов. Электронный ресурс URL: https://revolution.allbest.ru/construction/00637785_0.html (дата обращения 12.01.2026 г.)
21. Овчаренко Е.Г. Теплоизоляционные материалы и конструкции, М.: АСВ, 2003. с. 312
22. Соппротивление теплопередаче. Электронный ресурс URL: <https://acadomia.ru/> (дата обращения 12.01.2026 г.)
23. Золотухина Н. В. Сравнительный анализ утепляющих материалов в конструкции стен гражданских зданий // «Инновации в строительстве - 2018» материалы МНПК 2018. с.265-270

УДК 725.4.055

Золотухина Наталья Викторовна,
ст. преп. каф. архитектуры и дизайна;
Гордиенко Ксения Евгеньевна,
студ. бакалавра 4 к. кафедры архитектуры и дизайна,
БПИ ГОУ «ПГУ им. Т.Г. Шевченко»

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБЪЕКТА В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ТРЕБОВАНИЙ УСТОЙЧИВОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

В статье рассматриваются современные подходы к проектированию промышленных объектов с учетом принципов устойчивого строительства. Особое внимание уделяется комплексной интеграции архитектурно-планировочных, конструктивных, инженерных и технологических решений, направленных на повышение энергоэффективности, долговечности и экологической безопасности зданий. Определены ключевые направления повышения эффективности промышленного строительства. Сделаны выводы о практических преимуществах применения комплексного подхода при проектировании современных производственных зданий в учебном процессе.

Ключевые слова: устойчивое строительство, промышленное здание, комплексное проектирование, энергоэффективность, ресурсосбережение, архитектурно-планировочные решения, экологическая безопасность, инженерные системы.

Развитие строительной отрасли в XXI веке сопровождается ростом требований к устойчивости и экологической безопасности объектов, что особенно актуально для промышленных зданий. Производственные сооружения представляют собой сложные инженерные системы, функционирование которых требует значительных ресурсов: строительных материалов, энергии и рабочей силы. Современные промышленные объекты должны сочетать в себе высокую функциональность, надежность конструкций и минимальное воздействие на окружающую среду. Объемно-планировочные решения зданий и помещений должны обеспечивать возможность реконструкции и технического перевооружения производства, изменения технологических процессов и перехода на новые виды продукции [1, с. 2].

Научно-технический прогресс и рост производственных потребностей вызывают необходимость внедрения инновационных подходов к проектированию промышленных зданий. Важнейшим направлением является комплексное проектирование, которое рассматривает промышленное сооружение как интегрированную систему, включающую архитектурные, конструктивные, инженерные и технологические компоненты. Такой подход позволяет учитывать взаимное влияние всех элементов здания и оптимизировать их работу на протяжении всего жизненного цикла объекта. Архитектурные решения производственных объектов следует принимать с учетом градостроительных, климатических условий района строительства и характера окружающей застройки [1, с.3].

Комплексное проектирование промышленного здания включает в себя несколько ключевых аспектов. Во-первых, это архитектурно-планировочные решения, обеспечивающие рациональное использование пространства и оптимальные условия для технологических процессов. Во-вторых, конструктивные решения, направленные на повышение прочности и долговечности строительных конструкций. В-третьих, инженерные системы, обеспечивающие энергосбережение, вентиляцию, водоснабжение, электроснабжение и безопасность здания. В-четвертых, экологические и социальные аспекты, включая минимизацию воздействия на окружающую среду и создание безопасной и комфортной среды для персонала с учетом действующих нормативов по проектированию [1-18].

В литературном источнике [19, с.7] отмечается, что применение комплексного подхода при проектировании промышленных объектов позволяет добиться значительного снижения эксплуатационных расходов, повышения энергоэффективности и долговечности зданий, а также оптимизировать использование строительных материалов. Такой подход соответствует международным стандартам устойчивого строительства и современным требованиям экологической безопасности.

Актуальность темы обусловлена тем, что промышленное строительство требует комплексных решений, позволяющих учитывать все аспекты функционирования здания, включая технологические, конструктивные, экологические и экономические факторы. Учитывая современные тенденции, промышленное проектирование должно опираться на принципы устойчивого развития, обеспечивая гармоничное сочетание экономической целесообразности, технологической эффективности и экологической безопасности.

Комплексный подход при проектировании промышленных объектов машиностроительной промышленности выполняется студентами при курсовом проектировании по дисциплине «Конструкции промышленных зданий» при решении объемно-планировочной и конструктивной схемы проектируемых объектов, обеспечивающие рациональное использование пространства и высокую прочность, и долговечность строительных конструкций; при выборе инженерных систем, обеспечивающих энергосбережение, вентиляцию, водоснабжение, электроснабжение и безопасность производственного здания, все проектные решения проводятся с учетом экологических и социальных аспектов (рисунок 1) в полном соответствии с требованиями норм [1-18].

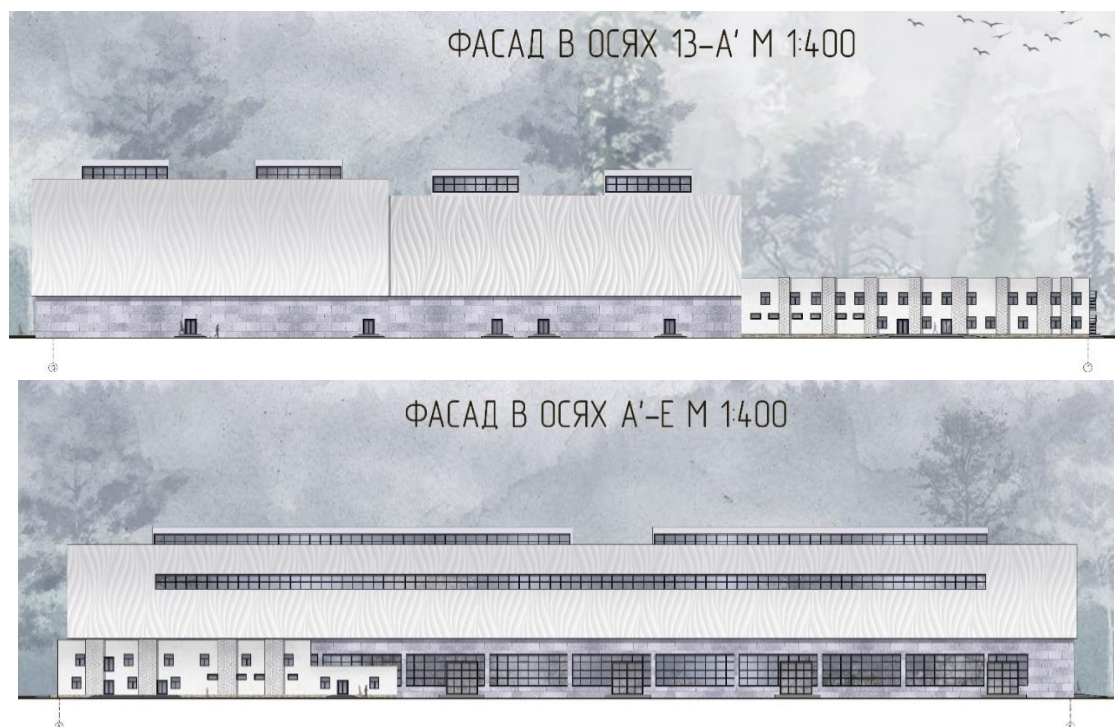


Рисунок 1 - Фасады курсового проекта «Проектирование станкостроительного цеха завода «Тирточстанок» в г. Тирасполь» студентки 3 курса Гордиенко К. Е. 2024-2025 уч. год; руководитель проекта Золотухина Н. В.

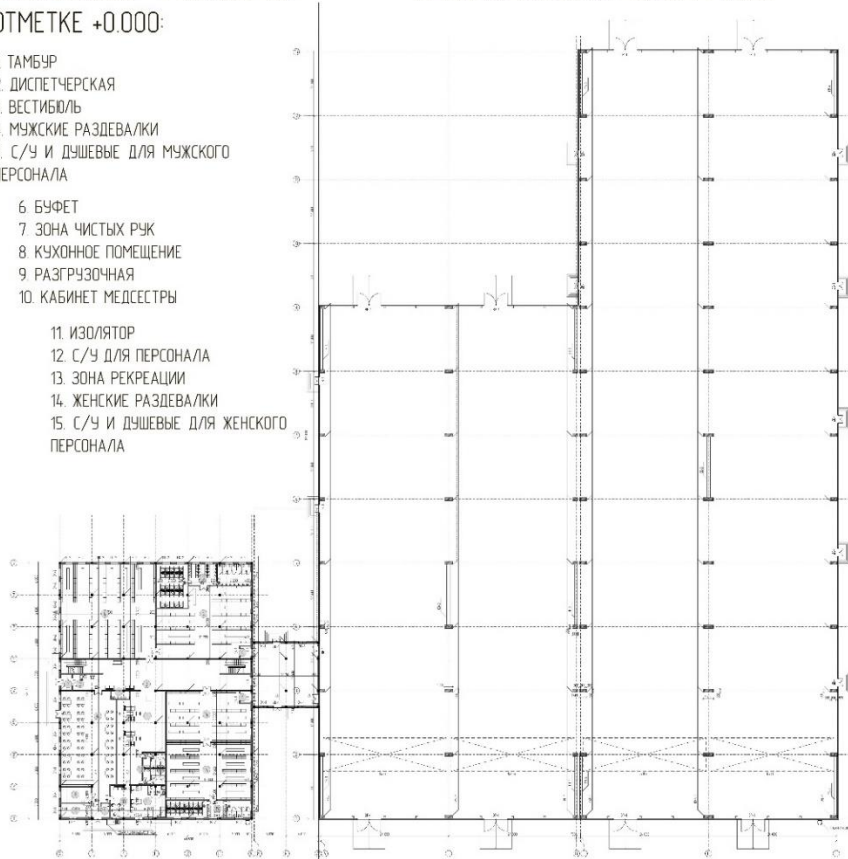
Цель исследования: анализ и обоснование применения комплексного подхода к проектированию промышленных объектов с учетом современных требований устойчивого строительства на примере курсового проекта Гордиенко К.Е. «Проектирование станкостроительного цеха завода «Тирточстанок» в г. Тирасполь» (рисунок 1, рисунок 2).

Задачи исследования:

ЭКСПЛИКАЦИЯ К ПЛАНУ НА
ОТМЕТКЕ +0.000:

1. ТАМБУР
2. ДИСПЕТЧЕРСКАЯ
3. ВЕСТИБЮЛЬ
4. МУЖСКИЕ РАЗДЕВАЛКИ
5. С/У И ДУШЕВЫЕ ДЛЯ МУЖСКОГО ПЕРСОНАЛА
6. БУФЕТ
7. ЗОНА ЧИСТЫХ РУК
8. КУХОННОЕ ПОМЕЩЕНИЕ
9. РАЗГРУЗОЧНАЯ
10. КАБИНЕТ МЕДСЕСТРЫ
11. ИЗОЛЯТОР
12. С/У ДЛЯ ПЕРСОНАЛА
13. ЗОНА РЕКРЕАЦИИ
14. ЖЕНСКИЕ РАЗДЕВАЛКИ
15. С/У И ДУШЕВЫЕ ДЛЯ ЖЕНСКОГО ПЕРСОНАЛА

ПЛАН НА ОТМЕТКЕ +0.000 М 1:400

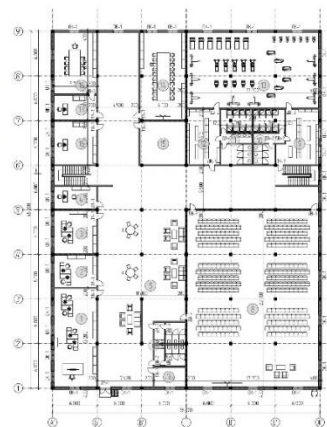


а

ЭКСПЛИКАЦИЯ К ПЛАНУ НА
ОТМЕТКЕ +3.300:

1. КАБИНЕТ ГЛАВНОГО ИНЖЕНЕРА
2. ОТДЕЛ КАДРОВ
3. БУХГАЛТЕРИЯ
4. КАБИНЕТ ПСИХОЛОГА
5. ЗОНА РЕКРЕАЦИИ
6. С/У ДЛЯ ПЕРСОНАЛА
7. ТЕХПОМЕЩЕНИЕ
8. ЗАЛ ДЛЯ КОНФЕРЕНЦИЙ
9. ЖЕНСКАЯ РАЗДЕВАЛКА
10. С/У И ДУШЕВЫЕ ДЛЯ ЖЕНСКОГО ПЕРСОНАЛА
11. С/У И ДУШЕВЫЕ ДЛЯ МУЖСКОГО ПЕРСОНАЛА
12. МУЖСКАЯ РАЗДЕВАЛКА
13. СПОРТЗАЛ
14. ЗАЛ ДЛЯ ЗАСЕДАНИЙ
15. АРХИВ
16. КАБИНЕТ ЗАМДИРЕКТОРА

ПЛАН НА ОТМЕТКЕ +3.300 М 1:400



б

Рисунок 2 - Курсовой проект «Проектирование станкостроительного цеха завода «Тиртоцстанок» в г. Тирасполь» студентки 3 курса Гордиенко К. Е. 2024-2025 уч. год; руководитель проекта Золотухина Н. В.: а- план на отметке 0,00; б- план на отметке +3,30

- изучить современные тенденции устойчивого строительства в промышленной отрасли;
- проанализировать требования к проектированию промышленных зданий;
- рассмотреть принципы комплексного проектирования и их применение в промышленных объектах;

- исследовать роль архитектурно-планировочных, конструктивных и инженерных решений в обеспечении устойчивости и энергоэффективности зданий.
- определить направления повышения экологической и экономической эффективности промышленного объекта.
- сформулировать рекомендации по применению комплексного подхода при проектировании современных промышленных зданий на примере курсового проекта «Проектирование станкостроительного цеха завода «Тирточстанок» в г. Тирасполь» Гордиенко К. Е. (рисунок 1-3).



Рисунок 3 - Визуализация железобетонного блока станкостроительного цеха завода «Тирточстанок» в г. Тирасполь», Гордиенко К. Е. 2024-2025 уч. год; руководитель проекта Золотухина Н. В.

Научная новизна исследования заключается в систематизации принципов комплексного проектирования промышленных объектов с учетом современных требований устойчивого строительства, а также в обосновании взаимосвязи архитектурно-планировочных, конструктивных и инженерных решений, направленных на повышение энергоэффективности и экологической устойчивости производственных зданий.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанных рекомендаций при проектировании промышленных зданий различного назначения при курсовом и дипломном проектировании. Использование комплексного подхода позволяет повысить эффективность проектных решений, снизить эксплуатационные затраты и обеспечить экологическую безопасность функционирования промышленных предприятий.

Промышленные здания относятся к объектам высокой материалоемкости и энергоемкости. Их проектирование требует учета множества факторов, включая размещение технологического оборудования, транспортные потоки, условия труда, а также показатели прочности и долговечности конструкций.

Станкостроительный цех направлен на производство различного спектра машин и устройств для промышленной обработки различных материалов, а именно: металло- и деревообрабатывающие станки, автоматические и полуавтоматические линии, комплексно-автоматические машиностроительные линии, станки с ЧПУ, кузнечнопрессовое, литейное и другое оборудование.

Площадка строительства цеха расположена на окраине р. Кировский, Промзона, г. Тирасполь, вдоль ул. Шевченко на свободном участке. Расположение и ориентация производственного здания на участке выполнено с соблюдением требований [1, 5, 8] к

ориентации и инсоляции помещений. Вертикальная планировка участка решена с учетом существующего рельефа с соблюдением требований [5].

На проектируемой территории выделены следующие объекты: административно-бытовой корпус; станкостроительный цех; контрольно-пропускной пункт; склад полуфабрикатов; склад готовой продукции; парковка для персонала; парковка для крупногабаритных машин; тепловой пункт; электрощитовая.

Цех включает в себя два блока, разделенных продольным деформационным швом. Размеры цеха в осях 1-13 – 144 м; в осях А-Е - 96,75 м. Несущий остов цеха – каркасный с рамно-связевой расчетной схемой. Материал несущих конструкций – железобетон и металл. Железобетонный блок: пролёт – 24 м; шаг колонн – 12 м; высота блока – 24 м; грузоподъёмность крана – 30 т. Металлический блок: пролёт – 24 м; шаг колонн – 12 м; высота блока – 22,85 м; грузоподъёмность крана – 30 т. Наружные стены – навесные, по проекту приняты сэндвич панели стальные оцинкованные с утеплителем полиэстер, толщиной 200 мм. Покрытие - прогонное. Несущим элементом являются фермы. По фермам устраиваются металлические прогоны, поверх прогонов кровельные сэндвич-панели, оцинкованные с утеплителем полиэстер, толщиной 200 мм.

Группа основных производственных процессов по санитарным характеристикам – Пв. Вследствие чего административно-бытовой блок расположен в отдельно стоящем здании, связь АБК и цеха производится наземной галереей (рис.2).

Несущий остов АБК – каркасный. Материал несущих конструкций – железобетон. С размерами в осях 1-10 - 48,5 м; в осях А-К - 48 м.

По числу этажей: цех – одноэтажный; АБК - двухэтажный. По числу пролетов: цех – четырехпролётный, АБК - шести пролётный. По конструктивным схемам покрытий – цех и АБК имеют каркасно-плоскостное покрытие. По системе отопления – цех – неотапливаемый, АБК - отапливаемый. По системе освещения: цех – естественное, АБК – естественное и искусственное.

Степень огнестойкости здания: цеха – IIIа, АБК - II. Класс капитальности здания: цеха – II, АБК – II. Степень долговечности – цеха – II, АБК – II.

Цех оснащён воротами, которые составляют единую коммуникационную систему, обеспечивающую доступ погрузо-разгрузочного транспорта в помещение цеха, которые позволяют беспрепятственно перемещаться рабочему персоналу и технике внутри здания (рис.2, 3).

При разработке проекта станкостроительного цеха ключевым критерием являлся обоснованный выбор объёмно-планировочных и конструктивных решений, обеспечивающих технологическую целесообразность, безопасность эксплуатации и соответствие действующим нормативным требованиям [1-18]. Принятые решения должны не только удовлетворять функциональные потребности производства, но и учитывать требования надежности, долговечности, энергоэффективности и пожарной безопасности.

Объёмно-планировочная структура здания формируется исходя из характера технологического процесса станкостроения, который отличается значительной массой оборудования, наличием кранового обслуживания и необходимостью четкой организации производственных потоков. В связи с этим рациональным является применение одноэтажной схемы здания с прямоугольной конфигурацией в плане, что обеспечивает удобство размещения технологических линий и минимизацию внутренних перемещений. Пролетная система подбирается с учетом габаритов оборудования и зон обслуживания мостовых кранов, при этом шаг колонн принимается укрупненным, что позволяет повысить гибкость использования внутреннего пространства.

Высотные параметры цеха определялись исходя из требований к размещению подъемно-транспортного оборудования и безопасной эксплуатации мостовых кранов. Обеспечение необходимой высоты подкрановых путей и габаритов подстропильного пространства является обязательным условием соблюдения норм промышленной безопасности [1]. Дополнительно

учитывались требования к естественному и искусственному освещению, а также к воздухообмену, что влияет на выбор высоты и конфигурации покрытия [4, 8].

Планировочные решения предусматривают функциональное зонирование здания на производственные, вспомогательные и складские участки. Разделение потоков сырья, готовой продукции и персонала способствует повышению эффективности производства и снижению травматизма. Организация эвакуационных выходов, проходов и проездов осуществляется в соответствии с требованиями пожарной безопасности, что гарантирует возможность безопасной эвакуации людей в случае чрезвычайных ситуаций [9, 18].

Конструктивная схема здания выбиралась с учетом нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации, а также экономической эффективности. Для станкостроительных цехов целесообразно применение каркасной системы, выполненной из сборного железобетона или металла. Каркасное решение обеспечивает необходимую несущую способность, устойчивость и пространственную жесткость здания, а также позволяет сократить сроки строительства за счет индустриализации процессов [10, 16, 17].

Колонны каркаса проектировались с учетом восприятия вертикальных нагрузок от покрытия, кранового оборудования и собственного веса конструкций, а также горизонтальных воздействий, включая ветровые нагрузки и динамические усилия от работы кранов. Применение подкрановых балок и жестких узлов сопряжения элементов обеспечивает надежную передачу нагрузок и устойчивость системы в целом. Покрытие проектом предусмотрено с использованием железобетонных и стальных ферм, выбор которых определяется величиной пролета и экономическими соображениями.

Ограждающие конструкции принимались проектом с учетом требований теплотехнической эффективности и долговечности. Использование современных сэндвич-конструкций позволяет снизить теплопотери и обеспечить нормативные показатели сопротивления теплопередаче [2, 7]. Кровля выполняется с учетом требований водоотвода, герметичности и устойчивости к климатическим воздействиям [3].

Особое внимание уделялось соблюдению требований нормативных документов, регулирующих проектирование промышленных зданий [1, 18]. К ним относятся положения, устанавливающие расчетные нагрузки и воздействия, требования к железобетонным и металлическим конструкциям, нормы по пожарной безопасности, санитарно-гигиенические требования и правила обеспечения энергоэффективности [1-18]. Проверка принятых решений на соответствие данным нормативам подтверждает их обоснованность и надежность.

Таким образом, выбранные объемно-планировочные и конструктивные решения станкостроительного цеха являются технически и экономически оправданными. Они обеспечивают эффективное функционирование производственного процесса, соответствуют требованиям безопасности и нормативной базе, а также создают условия для возможной модернизации и расширения производства в будущем.

Для станкостроительного цеха в г. Тирасполь повышение энергоэффективности целесообразно обеспечивать за счет согласованного внедрения архитектурных, инженерных и технологических решений, адаптированных к климату региона и специфике производства.

В объемно-планировочной части приоритет отдавался компактной форме здания, рациональной ориентации и активному использованию естественного освещения через фонари верхнего света и протяженные световые проемы. Это снижает потребность в искусственном освещении и улучшает условия труда. Ограждающие конструкции проектом приняты из многослойных элементов с повышенными теплоизоляционными характеристиками и герметичными узлами, что минимизирует теплопотери.

Дополнительный энергетический эффект достигается за счет использования плоской малоуклонной кровли как функциональной площадки для размещения солнечных батарей. Фотоэлектрические панели могут частично покрывать потребности цеха в электроэнергии, особенно в дневные часы пиковой нагрузки. Рациональная ориентация панелей и отсутствие затенения повышают их эффективность, а интеграция с общей системой энергоснабжения позволяет снизить нагрузку на внешние сети.

Снижение энергопотребления обеспечивается внедрением светодиодного освещения с автоматическим регулированием по датчикам присутствия и уровня освещенности. Инженерные системы проектируются по принципу адаптивности: вентиляционные установки оснащаются рекуперацией тепла, а насосы и вентиляторы - частотно-регулируемыми приводами, что позволяет гибко подстраивать их работу под текущие условия.

Существенным резервом является модернизация технологического оборудования: применение энергоэффективных электродвигателей, оптимизация режимов их работы и снижение потерь в системах сжатого воздуха. Управление всеми инженерными процессами целесообразно объединить в автоматизированную систему, обеспечивающую мониторинг и оперативную корректировку энергопотребления.

Важным элементом ресурсосбережения является организация системы сбора и использования дождевых вод. С кровли вода направляется в накопительные резервуары с последующей фильтрацией и может применяться для технических нужд: охлаждения оборудования, уборки помещений, полива территории. Это позволяет сократить потребление питьевой воды и снизить нагрузку на водоотведение.

Дополнительно проектом предусмотрено использовать вторичные энергетические ресурсы, в частности утилизировать тепло, выделяемое оборудованием, для нужд отопления или подогрева приточного воздуха. Проектом принято решение о вторичном использовании отходов в станкостроительном цехе для иной продукции - переработка металлической стружки, которая остаётся после обработки деталей на станках, прессуется в брикеты и используется для переплавки. Данное решение позволит сократить расход материалов и снизить вредное воздействие на окружающую среду.

Таким образом, внедрение солнечной генерации, повторного использования дождевых вод и комплекса энергосберегающих решений обеспечивает снижение эксплуатационных затрат, повышение автономности и экологической устойчивости станкостроительного цеха.

В условиях усиления экологических требований и роста ресурсных ограничений устойчивое строительство становится ключевым направлением развития промышленной архитектуры. Под устойчивым строительством понимается комплексный подход к проектированию, возведению и эксплуатации зданий, направленный на минимизацию негативного воздействия на окружающую среду, повышение энергоэффективности и обеспечение долговечности конструкций [20].

Современные промышленные объекты, такие как производственные цеха, склады и логистические комплексы, характеризуются значительными площадями и высоким уровнем энергопотребления. В связи с этим внедрение принципов устойчивого строительства приобретает особую актуальность.

Одной из ведущих тенденций является повышение энергоэффективности зданий. На стадии проектирования применяются методы оптимизации теплотехнических характеристик ограждающих конструкций: используются многослойные стеновые панели, эффективные утеплители, подбор которых в курсовом проектировании проводится с выполнением теплотехнических расчетов с учётом требований нормативов [2], [7], [11]. Особое внимание уделяется снижению теплопотерь через герметичные оконные системы, кровлю и фундаменты. Кроме того, активно внедряются системы рекуперации тепла, позволяющие использовать вторичную энергию производственных процессов.

Важным направлением является интеграция возобновляемых источников энергии. На кровлях и фасадах промышленных зданий размещаются солнечные панели, используются тепловые насосы. Это позволяет частично или полностью обеспечить объект собственной энергией, снижая зависимость от внешних сетей.

Значительное развитие получила тенденция рационального использования строительных материалов. При проектировании предпочтение отдаётся материалам с низким углеродным следом, а также продукции вторичной переработки. Широко применяются металлические конструкции с возможностью повторного использования, переработанный

бетон, композитные материалы. Кроме того, оптимизируются конструктивные схемы с целью снижения материалоемкости без потери прочностных характеристик.

Отдельного внимания заслуживает применение индустриального строительства. Заводская готовность элементов позволяет сократить сроки строительства, уменьшить количество отходов на площадке и повысить качество конструкций. Современные тенденции также включают управление водными ресурсами. В проектировании предусматриваются системы сбора и повторного использования дождевой воды, а также технологии очистки производственных стоков. Это снижает нагрузку на инженерные сети и уменьшает потребление пресной воды.

Существенную роль играет цифровизация проектирования, в частности использование BIM-технологий. Информационное моделирование зданий позволяет на ранних этапах выявлять неэффективные решения, оптимизировать расход ресурсов и прогнозировать эксплуатационные характеристики объекта. Это способствует принятию более обоснованных инженерных решений.

Не менее важной тенденцией является создание безопасной и комфортной производственной среды. Устойчивое строительство предполагает обеспечение качественной вентиляции, естественного освещения, акустического комфорта, что положительно влияет на производительность труда и здоровье персонала.

Таким образом, современные подходы к проектированию промышленных объектов направлены на формирование энергоэффективных, экологически безопасных и экономически оправданных решений. Комплексное внедрение указанных тенденций позволяет не только снизить эксплуатационные затраты, но и повысить конкурентоспособность предприятий в условиях устойчивого развития экономики. Все вышеперечисленные тенденции проектирования объектов производства были учтены при проектировании станкостроительного цеха завода «Тирточстанок» в г. Тирасполь. Был использован принцип поиска аналогов для проектных решений с учетом требований устойчивого строительства, приведем несколько примеров изучаемых аналогов как иллюстрации современных устойчивых решений.

1. Tesla Gigafactory Nevada - крупный завод по производству аккумуляторов и электромобилей. Особенности завода: ориентация здания и форма крыши оптимизированы под установку солнечных панелей; стремление к полной энергонеzáвисимости за счёт возобновляемых источников; минимизация отходов производства и замкнутые циклы переработки материалов.

2. BMW Leipzig Plant - автомобильный завод, спроектированный с учётом экологических требований. Особенности завода: использование ветряных турбин непосредственно на территории предприятия; эффективное естественное освещение производственных помещений; система повторного использования воды в технологических процессах.

3. Unilever Sustainable Living Complex - промышленно-административный комплекс компании Unilever. Особенности комплекса: применение энергосберегающих фасадных решений; системы сбора дождевой воды; снижение энергопотребления за счёт автоматизации инженерных систем.

4. Siemens Amberg Electronics Plant - высокотехнологичное производство электроники. Особенности производственного объекта: цифровизация процессов (интеграция BIM и автоматизации); высокая энергоэффективность оборудования и здания; минимальные потери ресурсов за счёт точного управления производством.

В современной практике формирования производственной среды машиностроительных предприятий всё более значимым становится интегрированный подход к проектированию, при котором объект рассматривается не как совокупность отдельных элементов, а как взаимосвязанная система, функционирующая в рамках заданных технологических и эксплуатационных параметров. Подобный подход позволяет учитывать множественные факторы - от специфики производственного цикла до требований к инженерной инфраструктуре - на ранних стадиях разработки учебной и рабочей проектной документации.

Комплексный подход рассматривает промышленное здание как интегрированную систему, где архитектурные, конструктивные, технологические и инженерные решения согласуются между собой. Основные принципы комплексного проектирования: согласование архитектурных и технологических решений; рациональный выбор конструктивной схемы; оптимизация использования материалов; внедрение энергоэффективных инженерных систем; обеспечение экологической безопасности и минимизации негативного воздействия на окружающую среду; повышение адаптивности и гибкости здания для изменений технологических процессов.

Базовым положением комплексного проектирования выступает принцип целостного системного анализа, предполагающий синхронизацию архитектурных, конструктивных и технологических решений. В условиях машиностроительного производства это выражается в необходимости строгого соответствия пространственной организации здания логике технологических потоков. Любое несоответствие между планировочной структурой и последовательностью операций приводит к возникновению избыточных перемещений, усложнению логистики и снижению общей производственной эффективности.

Ключевую роль играет принцип приоритетности технологических требований, в рамках которого формирование объёмно-планировочной схемы подчиняется характеристикам применяемого оборудования и особенностям производственных процессов. Машиностроительные предприятия, как правило, оснащаются тяжёлым и габаритным оборудованием, что требует разработки специальных конструктивных решений: усиленных оснований, пространственных каркасов, подкрановых путей и элементов, воспринимающих динамические нагрузки. Таким образом, конструктивная система здания становится производной от технологической составляющей.

Неотъемлемой частью комплексного подхода является рационализация функционально-пространственного зонирования. Производственные зоны, участки складирования, транспортные коридоры и вспомогательные помещения должны формировать логически выстроенную структуру, минимизирующую пересечения потоков сырья, полуфабрикатов и готовой продукции. При этом учитываются не только экономические показатели, но и требования охраны труда, промышленной санитарии и безопасности.

В условиях ускоренного обновления технологий особую значимость приобретает принцип трансформируемости и адаптивности пространственной среды. Проектируемые объекты должны обладать резервами для модернизации без существенного вмешательства в несущие конструкции. Это достигается посредством укрупнения шагов колонн, увеличения пролётов, применения универсальных модульных сеток и отказа от избыточной жёсткой планировочной фиксации с учетом всех требований норм [1].

Отдельного рассмотрения требует интеграция инженерно-технических систем, которая в рамках комплексного проектирования осуществляется не постфактум, а параллельно с разработкой архитектурных и конструктивных решений. Для машиностроительных предприятий характерна высокая энергоёмкость и необходимость точного поддержания параметров микроклимата, что обуславливает сложность систем вентиляции, электроснабжения и автоматизации. Их согласованное размещение позволяет избежать конфликтов между инженерными коммуникациями и строительными конструкциями.

Существенным аспектом является обеспечение многоуровневой безопасности, включающей конструктивную надёжность, устойчивость к аварийным воздействиям, пожарную защищённость и снижение вредных производственных факторов. В машиностроительной отрасли это также связано с необходимостью учёта вибрационных нагрузок, шума и локальных динамических воздействий, возникающих при работе оборудования. Не менее значимым остаётся принцип экономико-эксплуатационной оптимизации, в рамках которого анализируются не только капитальные затраты, но и жизненный цикл объекта в целом.

Комплексное проектирование позволяет выявить и устранить потенциально неэффективные решения ещё на стадии разработки, что способствует снижению совокупных издержек в процессе эксплуатации.

Современный этап развития проектной деятельности характеризуется активным внедрением цифровых инструментов, что отражается в реализации принципа информационной согласованности (рис. 1-3). Применение технологий информационного моделирования обеспечивает формирование единой цифровой среды, в которой объединяются все разделы проекта. Это позволяет повысить точность расчётов, упростить координацию участников и обеспечить контроль за изменениями на всех этапах жизненного цикла объекта.

Таким образом, комплексное проектирование в машиностроительной отрасли представляет собой многоуровневую систему взаимосвязанных решений, направленных на достижение максимальной функциональной эффективности, технологической целесообразности и эксплуатационной надёжности. Его реализация обеспечивает формирование производственных объектов, способных адаптироваться к изменяющимся условиям и требованиям современного промышленного производства.

Архитектурно-планировочные решения промышленного объекта должны обеспечивать эффективную организацию пространства, рациональное размещение технологического оборудования и удобство транспортных потоков. Особое внимание уделяется: выбору оптимальных пролетов и высоты помещений; размещению административно-бытовых зон; организации естественного освещения и вентиляции; созданию безопасных зон для персонала и посетителей.

Современная практика проектирования производственных зданий демонстрирует переход от традиционного набора разрозненных решений к формированию интегрированных систем, в которых архитектурно-планировочные, конструктивные и инженерные компоненты выступают не как автономные элементы, а как взаимозависимые уровни единой структуры. В этой связи устойчивость и энергоэффективность целесообразно рассматривать не как заданные показатели, достигаемые путём внедрения отдельных технологий, а как результат согласованного функционирования всей проектной модели.

С позиции авторов, архитектурно-планировочные решения формируют так называемый «пассивный потенциал» энергоэффективности здания. Иначе говоря, именно на стадии пространственной организации закладываются исходные условия, которые либо способствуют снижению энергопотребления, либо изначально формируют предпосылки к его увеличению. Компактность объёма, логика размещения функциональных зон и ориентация здания в большинстве случаев оказывают более долговременное влияние, чем последующее внедрение инженерных систем. Таким образом, можно утверждать, что ошибки планировочного характера практически невозможно полностью компенсировать техническими средствами.

Конструктивные решения, в авторской интерпретации, следует рассматривать как «физический каркас устойчивости», который определяет границы допустимых изменений параметров здания. При этом устойчивость понимается не только как способность воспринимать нагрузки, но и как возможность сохранять эксплуатационные характеристики при изменении внешних условий. Выбор конструктивной схемы напрямую влияет на энергетическое поведение здания. Инженерные решения выполняют функцию «активного регулятора», который компенсирует неизбежные отклонения, возникающие в процессе эксплуатации. Однако их роль не должна переоцениваться: при неэффективной архитектурной или конструктивной базе даже самые современные инженерные системы работают в режиме повышенных затрат. В этом смысле энергоэффективность инженерной инфраструктуры следует рассматривать не изолированно, а в контексте её согласованности с другими элементами здания.

Особое значение имеет переосмысление категории устойчивости. В рамках данного исследования предлагается трактовать её как способность производственного здания к функциональной саморегуляции в условиях изменяющихся внешних и внутренних факторов.

Это включает не только физическую надёжность конструкций, но и адаптивность планировочной структуры, а также гибкость инженерных систем. Такой подход позволяет выйти за рамки статической оценки и рассматривать здание как динамическую систему.

Авторская позиция также заключается в том, что наибольший эффект достигается не за счёт максимизации отдельных показателей, а путём их балансировки. Попытка достичь экстремальной энергоэффективности только за счёт инженерных решений без учёта архитектурной логики приводит к неоправданному усложнению систем. Аналогично, чрезмерная оптимизация конструктивной схемы без учёта эксплуатационных факторов может снизить адаптивность здания.

В результате проведённого анализа можно сделать вывод о том, что устойчивость и энергоэффективность производственных зданий формируются как синергетический эффект взаимодействия трёх ключевых подсистем. Архитектурно-планировочные решения задают исходные условия функционирования, конструктивные — определяют физические границы устойчивости, а инженерные — обеспечивают оперативное управление параметрами среды.

Только при их согласованной реализации возможно достижение высокого уровня эксплуатационной эффективности. Таким образом, авторская интерпретация позволяет рассматривать производственное здание не как статичный объект, а как адаптивную систему, в которой устойчивость и энергоэффективность являются производными от качества проектных решений и степени их интеграции. Данный подход открывает возможности для более глубокого анализа и совершенствования методов проектирования в машиностроительной и других отраслях промышленности.

Современное проектирование станкостроительных цехов ориентируется не только на технологическую функциональность, но и на комплексное повышение эффективности производственной среды, включающее экологические, энергетические и экономические аспекты. Для промышленного объекта подобного типа особую значимость приобретает системный подход, при котором все инженерно-строительные решения рассматриваются как взаимосвязанные элементы единой ресурсной модели.

Одним из ключевых направлений является совершенствование архитектурно-планировочной организации здания. Рациональное зонирование производственных процессов, оптимизация технологических потоков и сокращение внутренних транспортных перемещений позволяют снизить энергозатраты, повысить производительность труда и уменьшить косвенное воздействие на окружающую среду. Дополнительно важную роль играет формирование компактного объемно-пространственного решения, минимизирующего теплопотери и обеспечивающего эффективное использование естественного освещения (рис. 1, 2).

Значительный потенциал повышения эффективности связан с внедрением энергоэкономичных ограждающих конструкций. Применение современных теплоизоляционных материалов, многослойных стеновых систем и светопрозрачных элементов с улучшенными теплотехническими характеристиками способствует снижению потребности в искусственном отоплении и охлаждении. Это напрямую отражается как на энергетической составляющей эксплуатации, так и на сокращении выбросов углеродного следа.

Отдельное направление связано с модернизацией инженерных систем здания. Использование высокоэффективных систем вентиляции с рекуперацией тепла, интеллектуальных систем освещения на основе LED-технологий и автоматизированного управления микроклиматом позволяет существенно снизить эксплуатационные затраты. Внедрение систем мониторинга энергопотребления обеспечивает возможность оперативного контроля и корректировки режимов работы оборудования.

Рациональное использование материалов и технологий позволяет снизить себестоимость строительства, уменьшить количество строительных отходов и повысить экологическую устойчивость объекта.

Экологическая эффективность усиливается за счет внедрения ресурсосберегающих технологий, включая повторное использование технической воды, локальную очистку сточных вод и минимизацию образования производственных отходов. Важным аспектом также является применение экологически безопасных строительных материалов с низким уровнем эмиссии вредных веществ.

Экономическая составляющая эффективности достигается посредством оптимизации жизненного цикла объекта. Приоритет отдается решениям, обеспечивающим снижение капитальных вложений за счет рационального выбора конструктивных систем и последующее уменьшение эксплуатационных расходов благодаря энергоэффективным технологиям. Таким образом, достигается баланс между первоначальными инвестициями и долгосрочной экономической отдачей.

В совокупности данные направления формируют интегрированную стратегию повышения эффективности станкостроительного цеха, при которой экологическая устойчивость, энергетическая рациональность и экономическая целесообразность рассматриваются как взаимосвязанные параметры единой системы промышленного проектирования.

Комплексное проектирование позволяет сократить эксплуатационные расходы, повысить долговечность зданий и оптимизировать использование материальных и энергетических ресурсов. Энергоэффективные решения снижают затраты на эксплуатацию, что положительно сказывается на экономической эффективности предприятия.

Рекомендации по применению комплексного подхода при проектировании современных промышленных зданий. Практика проектирования современных промышленных объектов демонстрирует необходимость перехода от фрагментарного рассмотрения отдельных архитектурных, конструктивных и инженерных решений к комплексной модели формирования здания. В рамках курсового проекта станкостроительного цеха завода «Тирточстанок» в г. Тирасполь целесообразно реализован системный подход, при котором все проектные решения рассматриваются во взаимосвязи с технологическими, экологическими и экономическими требованиями.

Прежде всего рекомендуется обеспечить интеграцию технологической схемы производства с объемно-планировочной структурой здания. Рациональная организация производственных зон, минимизация пересечений потоков сырья, заготовок и готовой продукции, а также оптимизация транспортных связей внутри цеха позволяют существенно повысить эффективность функционирования предприятия и снизить непроизводительные энергозатраты.

Особое внимание следует уделить формированию энергоэффективной архитектурной модели здания. Компактность объемного решения, ориентация световых проемов с учетом инсоляции и применение естественного освещения в производственных зонах способствуют снижению потребления электрической энергии и улучшению микроклимата рабочей среды. Дополнительно рекомендуется использование ограждающих конструкций с повышенными теплоизоляционными характеристиками, что обеспечивает снижение теплопотерь в холодный период эксплуатации.

Важным направлением комплексного подхода является согласованное проектирование инженерных систем. Системы отопления, вентиляции и освещения должны рассматриваться как единый энергетический комплекс, функционирующий на основе принципов автоматизации и адаптивного регулирования. Применение рекуперативных установок, энергосберегающих светильников и интеллектуальных систем управления позволяет значительно сократить эксплуатационные расходы.

Экологическая составляющая проектирования должна обеспечиваться за счет внедрения решений, направленных на минимизацию негативного воздействия на окружающую среду [4]. К ним относятся снижение объемов выбросов тепла, рациональное водопотребление, организация локальных систем очистки и повторного использования технической воды, а также применение материалов с пониженным экологическим следом.

Экономическая эффективность комплексного подхода достигается за счет учета жизненного цикла здания, начиная от стадии проектирования и строительства и заканчивая эксплуатацией и возможной реконструкцией. Оптимизация капитальных вложений должна сочетаться с минимизацией эксплуатационных затрат, что в долгосрочной перспективе обеспечивает устойчивую рентабельность объекта.

Таким образом, реализация комплексного подхода при проектировании станкостроительного цеха позволяет сформировать сбалансированную систему, в которой архитектурные, конструктивные, инженерные и экологические решения объединены общей стратегией повышения эффективности промышленного здания.

Вывод. Проведенный анализ показал, что комплексный подход к проектированию промышленных объектов является одним из ключевых направлений развития современной строительной отрасли. Его применение позволяет обеспечить согласованность архитектурных, конструктивных и инженерных решений, повысить энергоэффективность зданий и снизить негативное воздействие на окружающую среду. Внедрение принципов устойчивого строительства способствует созданию долговечных, экономически эффективных и экологически безопасных промышленных объектов, отвечающих современным требованиям развития промышленности и строительной отрасли.

Список литературы

1. СНиП ПМР 31-09-02 "Производственные здания", издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2002 г., с.21
2. СНиП ПМР 23-03-2011 "Тепловая защита зданий", издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2011 г., с.30
3. СП ПМР 31-126-2011 "Кровли зданий и сооружений. Проектирование и строительство", издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2011 г., с.142
4. СНиП ПМР 41-01-2011 "Отопление, вентиляция и кондиционирование", издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2011 г., с.86
5. СНиП ПМР 30-01-2010 "Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений", издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2010 г., с.94
6. СНиП ПМР 22-03-2009 "Строительство в сейсмических районах", издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2009 г., с.38
7. СП ПМР 23-101-2004 «Проектирование тепловой защиты зданий», издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2011 г., с.54
8. СНиП ПМР 23-02-03 "Естественное и искусственное освещение", издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2003 г., с.54
9. СНиП ПМР 21-01-03 «Пожарная безопасность зданий и сооружений», издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2003 г., с.34
10. СНиП ПМР 53-01-02 «Стальные конструкции», издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2003 г., с.119
11. СНиП ПМР 23-01-02 "Строительная климатология и геофизика", издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2002 г., с.81
12. СНиП ПМР 30-06-02 "Благоустройство территории", издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2002 г., с.18
13. СНиП ПМР 52-05-02 «Несущие и ограждающие конструкции», издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2002 г., с.115
14. СНиП ПМР 31-02-02 "Полы", издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2002 г., с.17
15. СНиП ПМР 31-19-02 «Изоляционные и отделочные покрытия», издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2002 г., с.43
16. СНиП ПМР 20-03-02 "Защита строительных конструкций от коррозии", издательство: ГОУ ПМР
19. СНиП ПМР 50-04-02 "Земляные сооружения основания и фундаменты", издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2002 г., с.77

17. СНиП ПМР 52-01-02 «Бетонные и железобетонные конструкции», издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2002 г., с.127
18. СНиП ПМР 31-08-02 «Административные и бытовые здания», издательство: ГОУ ПМР, Тирасполь, 2002 г., с.23
19. Проектирование промышленных зданий предприятий стройиндустрии: учебное пособие / Л. И. Гулак, В. В. Власов, М. В. Агеенко; ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. – 75 с.
20. Халыева Б., Гурбангылыджов М., Бегполадов С. Устойчивое строительство: что это такое и как его достичь // Международный научный журнал «Вестник науки» №6, 2023 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ustoychivoe-stroitelstvo-cto-eto-takoe-i-kak-etogo-dostich/viewer> (дата обращения 28.01.2026).
21. Экологическое производство железнодорожных колес ТОО «Проммашкомплект»// Медиаресурс Вагон-груз URL: <https://wagon-cargo.ru/> (дата обращения 28.03.2024)

УДК 678.686

Яркин Юрий Александрович,
магистрант гр. ЗИЗОСм - 10а,
Самойлова Елена Эдуардовна,
доцент каф. ТБ,
ДОННАСА-филиал НИУ МГСУ

ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНАЯ ПЕРЕРАБОТКА НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ПРИРОДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

В данной статье рассмотрены вопросы проблематики управления отходами в нефтяной отрасли. Особое внимание уделяется технологическим решениям, способствующим достижению оптимальных экологических показателей. При этом принципиальным условием является безусловное соблюдение экологических нормативов в отношении чистоты генерируемых отходов.

Ключевые слова: опасные отходы, нефтешламы, методы переработки, шламовые амбары, утилизация, антропогенное воздействие, окружающая среда.

Каждый год в России накапливается свыше трёх миллионов тонн опасных отходов – нефтешламов. Львиная доля этих отходов (более миллиона тонн) поступает от компаний, которые добывают нефть. Заводы, перерабатывающие нефть, производят около 700 тысяч тонн, а нефтебазы – 300 тысяч тонн. Кроме того, около полумиллиона тонн нефтешламов образуется на объектах железнодорожного, воздушного и морского транспорта [1].

Нефтешламы представляют собой критическую угрозу для всех без исключения элементов природной среды, включая поверхностные и подземные водные объекты, почвенно-растительный покров и атмосферный воздух.

Нефтяной шлам – это неизбежный спутник нефтедобычи, транспортировки и переработки, образующийся повсеместно в нефтяной индустрии. Этот побочный продукт представляет собой сложную смесь, насыщенную токсичными компонентами: от высококанцерогенных полициклических ароматических углеводородов до тяжёлых металлов и даже радиоактивных элементов. Подавляющее большинство этих веществ несёт серьёзную угрозу как для здоровья человека, так и для окружающей среды.

Нефтешламы характеризуются высокой степенью гетерогенности и сложным многокомпонентным составом. В их структуру входят механические примеси (например, песок и глина), минерализованная водная фаза и углеводородная фаза (нефть или продукты её переработки). Соотношение этих компонентов не является фиксированным и определяется рядом факторов, включая источник образования шлама, условия его хранения и продолжительность воздействия этих условий. Типичные диапазоны концентраций составляют: нефтепродукты 10–56%, вода 30–85%, твёрдые примеси 1,3–46%. Следует отметить существенные различия в свойствах между свежесформованными нефтешламами и теми, что подвергались длительному хранению в шламонакопителях. В последних наблюдается потеря лёгких фракций вследствие испарения, миграция жидких мазутных компонентов в почву, а также обогащение состава за счёт внешних включений, таких как атмосферные осадки и дополнительные механические частицы [2].

На одну тонну перерабатываемой нефти приходится 7 кг нефтешламов, что приводит к большому скоплению последних в земляных амбарах нефтеперерабатывающих предприятий

[3]. Основные источники и виды загрязнения, а также состояние нефтешламов приведены в таблице 1 [2].

Таблица 1 - Источники загрязнения нефтепродуктами

Источники загрязнений	Виды загрязнений	Состояние
1	2	3
Добыча и подготовка	Проливы	Смесь грунта и нефтепродукта с содержанием воды до 20% масс., механических примесей от 80% масс.
Транспортировка	Морским транспортом	«Водонефтяная эмульсия с содержанием воды до 95%, в случае загрязнения побережья - до 80%, грунта до 30 %, нефтепродукта до 20%»
	Сухопутным транспортом Трубопроводным транспортом Разливы	Смесь грунта и нефтепродукта с содержанием воды до 2 0% масс. Содержание механических примесей от 80% масс.
Переработка	Зачистка резервуаров	Нефтепродукт с содержанием механических примесей до 5%, эмульгированной воды до 10 %
	Очистные сооружения, (пруды - отстойники и)	«В зависимости от уровня пруда изменяется состав продуктов: поверхность — до 80% нефтепродукта, до 20% воды, до 5% механических примесей, высокая концентрация флокулянта; середина — до 90% воды, до 10 % механических примесей, до 10 % нефтепродукта; дно — илистое с содержанием нефтепродукта до 1%»
Использование и хранение	Разливы на автозаправках, нефтебазах	Смесь грунта и нефтепродукта с содержанием воды до 2 0% масс., механических примесей от 80% масс.
	Зачистка резервуаров	Нефтепродукт с содержанием механических примесей до 5%, эмульгированной воды до 10 %

Сохранение невозобновляемых ресурсов и сокращение выбросов загрязняющих веществ в почву, воду и атмосферу является важной задачей защиты окружающей среды.

Поэтому, утилизация нефтешламов – необходимая мера для защиты окружающей среды и повышения экономической целесообразности производства нефтепродуктов.

Переработка и утилизация нефтешламов направлена на использование рентабельных и экологически безопасных технологий, применение типового оборудования и безотходной технологии очистки и утилизации.

Выбор метода переработки и обезвреживания нефтяных шламов, в основном, зависит от количества содержащихся в шламе нефтепродуктов.

Одним из наиболее эффективных и широко используемых способов переработки нефтесодержащих отходов является термический. Термический метод позволяет совместно с нефтешламами сжигать загрязненные фильтры, промасленную ветошь, твёрдые бытовые отходы.

Образующиеся при этом вторичные отходы относятся к 4 классу опасности и подлежат вывозу на полигоны захоронения. Объем вторичных отходов по сравнению с первоначальным уменьшается до 10 раз.

Существует три основных метода высокотемпературного обезвреживания нефтешлама: сжигание, пиролиз, газификация.

Общая схема сжигания отходов представлена на рисунке 1.

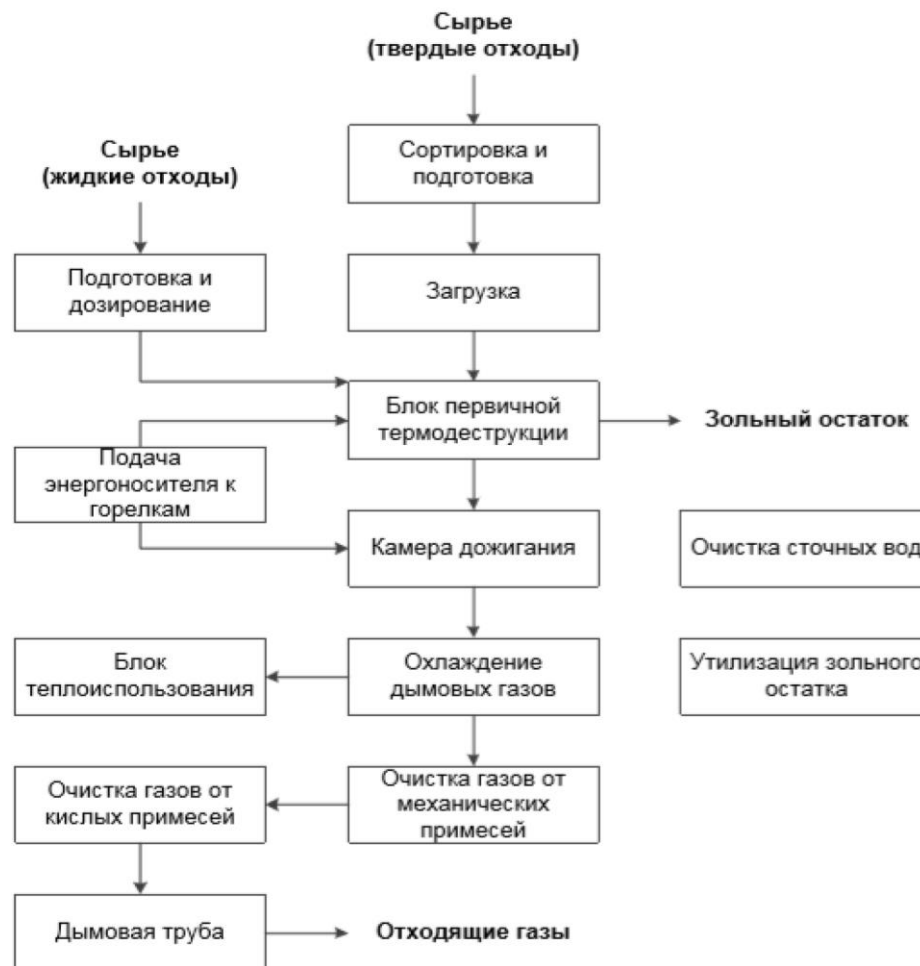


Рисунок 1 - Общая схема сжигания отходов

Приоритетным направлением при обращении с отходами является их использование в качестве вторичных материальных ресурсов. Это позволяет не только снизить экологическую нагрузку на окружающую среду, но и обеспечить более рациональное использование природных ресурсов.

Дорожное строительство является одной из областей, в которой нефтешламы применяются наиболее широко [4]. Они используются в составах нефтегрунта, цементогрунта, асфальтобетона, газобетона, шламобетона в качестве замены или добавки к органическому связующему, улучшая качество асфальтобетонных смесей за счёт повышения механической прочности, морозостойкости, водостойчивости, снижения водопоглощения, набухания, слеживаемости дорожного покрытия. Вместе с тем использование отходов нефтяной промышленности в строительстве дорог расширяет сырьевую базу грунтов, уменьшает энерго- и трудозатраты, снижает себестоимость дорожного покрытия и упрощает сам технологический процесс.

Однако, решения по переработке и утилизации нефтешламов должны предусматривать, прежде всего, оценку экологической безопасности применяемых технологий, и только затем – их экономическую привлекательность.

Список литературы

1. Полозов, М.Б. Экология нефтегазодобывающего комплекса: Учебно-методическое пособие / М.Б. Полозов – Ижевск: Удмуртский университет, 2012. – 174 с.
2. Кесельман, Г.С. Защита окружающей среды при добыче, транспорте, и хранении нефти и газа/ Г.С. Кесельман, Э.А. Махмудбеков – М.: Недра, 1981. – 256 с.
3. Пичугин, Е. А. Оценка воздействия бурового шлама на окружающую природную среду // Молодой ученый. — 2013. — №9. — С. 122-123.
4. Коршунова, Т.Ю., Логинов, О.Н. Нефтешламы: состояние проблемы в РФ и методы снижения их негативного воздействия на окружающую среду — Текст: электронный // Экобиотех-2019, Том 2, № 1, С. 75–85.

УДК 678.686

Радцев Александр Яковлевич,
студент гр. ИЗОСм - 10а;
Самойлова Елена Эдуардовна,
доцент каф. ТБ,
ДОННАСА-филиал НИУ МГСУ

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПУТЁМ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ОТХОДОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ И БИОУДОБРЕНИЙ

В данной статье рассмотрены технологические решения по утилизации отходов животноводства с целью получения полезной энергии, что является экологически безопасным и экономически выгодным решением проблемы снижения выбросов парниковых газов в атмосферу, а также поиск новых путей утилизации и обезвреживания навоза, которые удовлетворяли бы санитарно-гигиеническим требованиям, обеспечивали экологическое благополучие и были рентабельными с точки зрения уровня себестоимости производимой основной продукции.

Ключевые слова: отходы животноводства, утилизация, технологическое оборудование, анаэробное сбраживание, биогаз, биоудобрения.

Деятельность крупных животноводческих предприятий сопряжена с риском нанесения существенного экологического ущерба. В контексте современных экологических требований, данные производства нуждаются в модернизации. В качестве эффективного решения широко применяется установка биогазовых комплексов, функционирующих на принципах анаэробного сбраживания животноводческих отходов под воздействием микроорганизмов. Результатом этого процесса является получение биогаза и биоудобрений. Производство биогаза способствует предотвращению эмиссии метана в атмосферу, что является критически важным, поскольку улавливание метана признано одним из наиболее действенных методов борьбы с глобальным потеплением. Таким образом, потребление биогаза способствует снижению антропогенного воздействия метана [1].

Вопрос эффективной утилизации отходов, генерируемых животноводческими комплексами, представляет собой одну из наиболее острых и нерешённых задач в Российской Федерации.

Современные животноводческие и птицеводческие комплексы характеризуются значительным накоплением органических отходов в виде навоза и помета. Рациональная утилизация этих масс представляет собой не только потенциальный источник дополнительной экономической выгоды, но и путь к достижению практически безотходного производства. Однако текущая ситуация демонстрирует отсутствие систематизированных подходов к переработке органических отходов на крупных предприятиях, что создаёт серьёзные экологические риски для окружающей среды, несмотря на присутствие в помете таких опасных веществ, как аммиак и сероводород. В то же время, навоз и птичий помет являются высокоэффективными органическими удобрениями, содержащими полный спектр необходимых для растений питательных элементов в оптимальном соотношении. Следовательно, разработка и внедрение эффективных технологических решений для переработки животноводческих отходов с получением полезной энергии и ценных продуктов является приоритетной задачей.

Исследования показали, что анаэробная переработка является перспективным и практически значимым подходом к утилизации органических отходов животноводства. Этот метод эффективно ускоряет процесс разложения, в ходе которого органические компоненты

навоза распадаются с образованием биогаза, состоящего преимущественно из метана (50-70%) и углекислого газа (30-50%) [2].

Ключевое достоинство анаэробного метода заключается в его способности разделять бактериальные популяции, работающие в различных физико-химических средах. В отличие от традиционных аэробных процессов, где все микроорганизмы функционируют в единых условиях, такая организация анаэробного сбраживания позволяет целенаправленно оптимизировать его производительность, обеспечить управляемость и, как следствие, улучшить качество переработки и стабилизации отходов.

Исследование научной литературы выявило, что для эффективной переработки отходов животноводства и осуществления биотехнологических процессов, направленных на разложение органики с целью получения энергии и ценных продуктов, наиболее распространёнными методами являются: аэробное сбраживание, компостирование, термохимическая обработка, вермикомпостирование, а также комплексные технологические решения. На рисунке 1 представлены технологии переработки отходов животноводства.

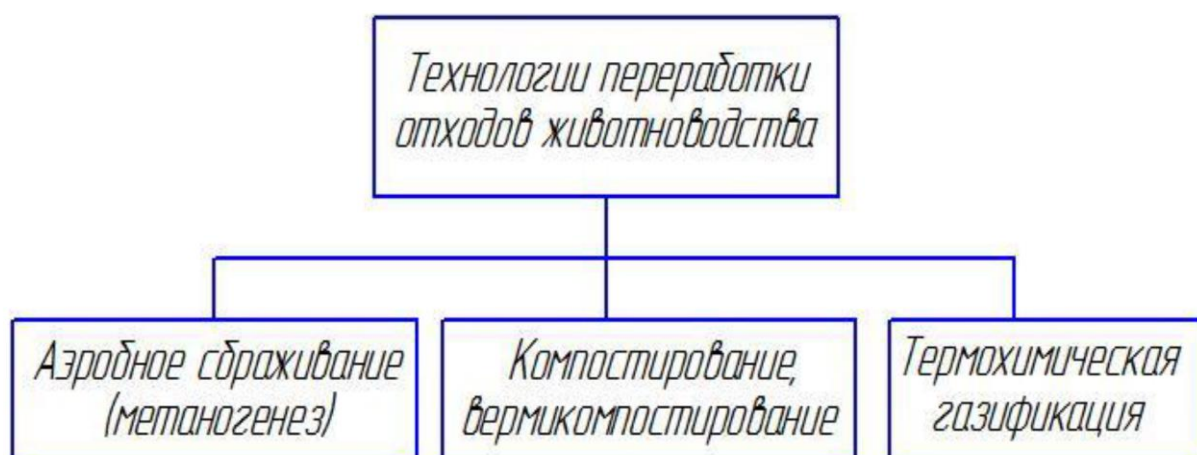


Рисунок 1 - Технологии переработки отходов животноводства

В настоящее время недостаточно внимания уделяется целому ряду других методов переработки отходов. Особенно важно отметить компостирование и получение органоминеральных удобрений из отходов, поскольку эти технологии обладают значительным потенциалом и требуют более активного развития.

Компостирование представляет собой аэробный процесс биоокисления, инициируемый микробными сообществами. В условиях повышенной температуры и оптимальной влажности происходит интенсивная деградация органического субстрата, сопровождающаяся экзотермическими реакциями. Конечным результатом является формирование стабильного, гумифицированного продукта, претерпевшего значительные физико-химические трансформации.

Компостирование – комплексный, многостадийный процесс. Каждая его стадия характеризуется различными консорциумами организмов. На рисунке 2 представлены стадии компостирования.

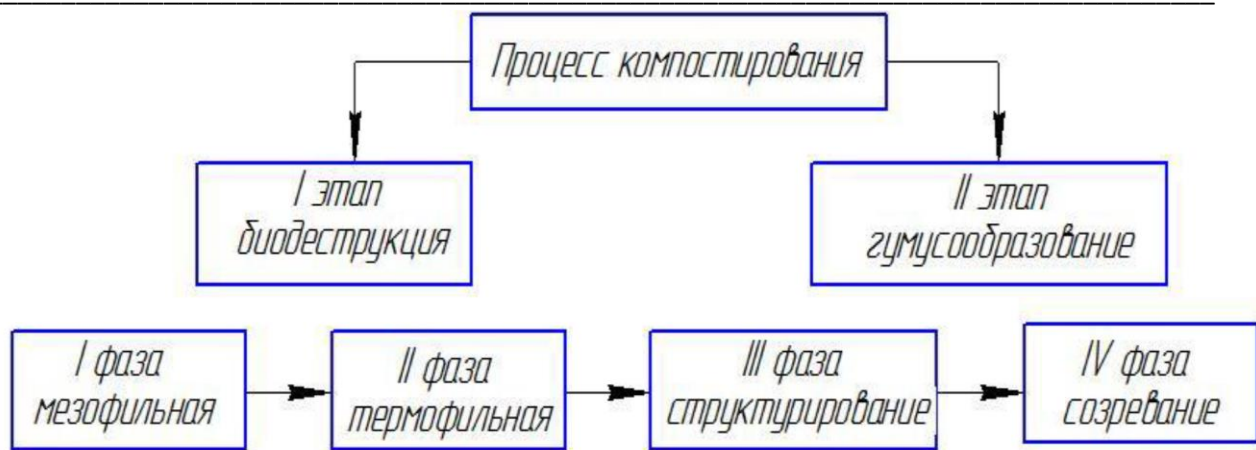


Рисунок 2 - Стадии компостирования

Продолжительность I, II, III стадий несколько суток и недель, IV – несколько месяцев [3].

Для ускорения процесса компостирования используются разнообразные химические, растительные и микробные стимуляторы. В случае переработки влажных органических материалов, таких как сырой активный ил и навоз, часто требуется добавление структурных материалов (например, древесной щепы, соломы, опилок) для обеспечения необходимой аэрации и поддержания рыхлой структуры компостной массы [3].

На основе сравнительного анализа технологий, оборудования и путей интенсификации процесса предлагается технологический комплекс, состоящий из четырёх модулей (рисунок 3).

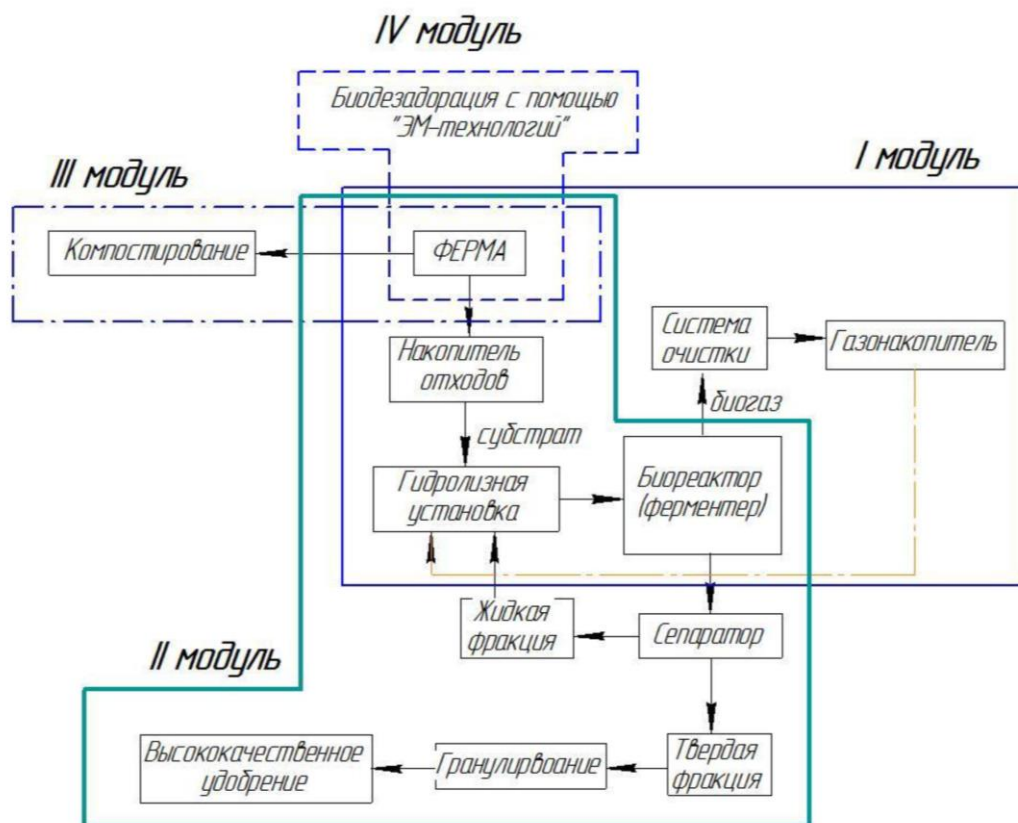


Рисунок 3 - Технологический комплекс дезодорации, получения биогаза и удобрений из отходов АПК

Отличительной особенностью предлагаемой технологии является наличие в составе биогазовой установки блока гидролиза, который придаёт преимущества биогазовой установке и позволит получать биогаз с более высоким содержанием метана (около 70%), а также сжигать твёрдые отходы гидролиза (лигноцеллюлоза), так как они не содержат минералов, получая при этом дополнительную энергию.

Удобрение, получаемое в жидком виде, может быть внесено в почву, может быть высушено и гранулировано, при необходимости брикетировано. При смешении в определённых пропорциях с различными составляющими могут быть получены компосты, почвенные смеси для теплиц и т.д.

Список литературы

1. Эфендиев А. М., Николаев Ю. Е., Евстафьев Д. П. Возможности энергообеспечения фермерских хозяйств на базе малых возобновляемых источников энергии // Теплоэнергетика. 2016. № 2. С. 38–45.
2. Бусин, И. В. Биотопливо из отходов животноводства / И. В. Бусин, А. П. Ликсутина, А. Ю. Корнев. - Текст: электронный // Сельский механизатор. - 2021. - № 7. - С. 29-31. - DOI: 10.47336/0131-7393-2021-7-2930-31.
3. Колдин, М. С. Анализ технологий и технических средств по переработке отходов животноводства /М. С. Колдин, И. П. Криволапов. - Текст: электронный // Наука и образование. - 2022. - Т. 5, № 3. - URL: <https://elibrary.ru/sdwpvm> (дата обращения: 20.02.2026).

УДК 697.432

Красильников Алексей Валерьевич,
магистрант гр. ЗТГВм-55а;
Шацков Артем Олегович,
к.т.н., доцент каф. ТТГВ,
ДОННАСА-филиал НИУ МГСУ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОТЛОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИХ КОНСТРУКЦИИ

Вопросы модернизации котлов малой мощности остаются крайне актуальными в России в связи с огромным количеством таких котлов (до 3,0–3,5 МВт), которые обеспечивают отопление и горячее водоснабжение жилых домов, административных зданий, небольших производств и сельских объектов — их доля в общем парке котельных превышает 80–85 %. Большинство таких установок эксплуатируется уже 15–30 лет, имеет низкий КПД (65–80 % вместо современных 92–98 %), высокий расход топлива и значительные выбросы загрязняющих веществ, что противоречит требованиям Федерального закона № 219-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» и национальному проекту «Экология». Совершенствование конструкции (новые горелки, теплообменники, системы рекуперации тепла, оптимизация топочного процесса) позволяет повысить энергоэффективность на 15–30 %, существенно снизить эксплуатационные затраты и уменьшить потребление природного газа или жидкого топлива в условиях постоянного роста тарифов. В рамках программ социальной газификации и перевода котельных на сетевой газ (план до 2030–2035 годов) именно модернизация существующих котлов малой мощности становится ключевым способом быстрого достижения целевых показателей без полной замены оборудования.

Ключевые слова: котлы малой мощности, энергоэффективность, конструктивная модернизация, теплообменные поверхности, рекуперация теплоты, КПД котла, теплогенерирующее оборудование.

Котлы малой мощности составляют значительную долю теплогенерирующего оборудования в Российской Федерации. По данным Минэнерго России, на начало 2024 года в стране эксплуатируется более 350 тысяч котельных установок суммарной мощностью до 100 кВт, обеспечивающих теплоснабжение жилых домов, административных зданий, объектов малого бизнеса и социальной инфраструктуры [3]. Значительная часть этого оборудования морально и физически устарела, что приводит к чрезмерному расходу топливных ресурсов и повышенным выбросам вредных веществ в атмосферу.

Анализ технического состояния котлов малой мощности выявляет ряд системных проблем. Средний КПД эксплуатируемых установок составляет 78–82%, что на 12–18% ниже показателей современных энергоэффективных моделей [5]. Основные потери теплоты происходят за счет:

- неполного сгорания топлива вследствие несовершенства конструкции топочного пространства;
- избыточной температуры уходящих дымовых газов (до 250–300°C);
- потерь теплоты через неизолированные поверхности корпуса;
- отсутствия или неэффективной работы систем автоматического регулирования процесса горения;
- низкой турбулизации газового потока в конвективной части котла.

Экспертные оценки показывают, что модернизация существующего парка котельного оборудования может обеспечить экономию природного газа на уровне 4–6 млрд кубометров ежегодно, что эквивалентно 120–150 млрд рублей в денежном выражении по ценам 2024 года

[7]. Это делает вопрос совершенствования конструкции котлов малой мощности экономически значимым для энергетического сектора страны.

Почему же столь масштабная модернизация до сих пор не осуществлена? Причины носят комплексный характер. С одной стороны, владельцы котельных сталкиваются с высокими первоначальными затратами на замену оборудования. С другой стороны, недостаточная осведомленность об экономических выгодах и современных технических решениях препятствует принятию инвестиционных решений.

Российские производители котельного оборудования в последние годы активизировали работу по созданию энергоэффективных моделей. Исследования ведущих научных центров, включая Московский энергетический институт и Санкт-Петербургский политехнический университет, направлены на разработку инновационных конструктивных решений, позволяющих повысить КПД котлов до 94-96% при сохранении приемлемой стоимости оборудования [2].

Регуляторная среда также претерпевает изменения. В 2023 году вступили в силу обновленные технические регламенты, устанавливающие минимальные требования к энергетической эффективности теплогенерирующего оборудования. Согласно новым нормам, вновь вводимые котлы малой мощности должны иметь КПД не ниже 90% при работе на номинальной нагрузке [4]. Эти требования стимулируют производителей к внедрению передовых технологий и совершенствованию конструкций.

Повышение эффективности котлов малой мощности достигается комплексным подходом, включающим модернизацию всех основных элементов теплогенерирующей установки. Рассмотрим детально наиболее перспективные технические решения, апробированные в российской практике.

Оптимизация топочного пространства представляет собой первоочередную задачу. Современные конструкции предусматривают увеличение времени пребывания топливно-воздушной смеси в зоне горения, что обеспечивает более полное сгорание топлива. Внедрение вихревых горелочных устройств позволяет интенсифицировать процесс смешения газа с воздухом и снизить выбросы оксидов азота на 25-30% [6]. Исследования показывают, что правильная геометрия топочной камеры с созданием зон рециркуляции продуктов сгорания повышает КПД котла на 3-5 процентных пунктов.

Важнейшим направлением является совершенствование теплообменных поверхностей. Традиционные гладкотрубные конструкции уступают место оребренным поверхностям с развитой геометрией. Применение спиральных и кольцевых ребер увеличивает площадь теплообмена в 2-2,5 раза при сохранении габаритов котла. Эксперименты, проведенные в Казанском национальном исследовательском технологическом университете, продемонстрировали рост коэффициента теплопередачи на 40-60% при использовании оребренных труб специального профиля [2].

Перспективным решением является применение пластинчатых теплообменников из нержавеющей стали в конвективной части котла. Их преимущества очевидны:

- высокая эффективность теплопередачи за счет турбулизации потока;
- компактность конструкции;
- возможность легкой очистки от продуктов неполного сгорания;
- долговечность при работе с агрессивными продуктами сгорания;
- модульность, позволяющая гибко изменять теплопроизводительность.

Снижение температуры уходящих газов достигается установкой экономайзеров — дополнительных теплообменных секций, утилизирующих теплоту дымовых газов для подогрева питательной воды или обратного теплоносителя. Современные экономайзеры обеспечивают охлаждение дымовых газов до 120-140°C, что дает прирост КПД на 5-8% [5].

Революционным направлением является внедрение конденсационных теплообменников, использующих скрытую теплоту парообразования водяного пара, содержащегося в продуктах сгорания. При охлаждении дымовых газов ниже точки росы (около 56°C для природного газа) происходит конденсация водяных паров с выделением значительного количества теплоты.

Конденсационные котлы достигают КПД 105-108% по низшей теплоте сгорания топлива, что делает их наиболее эффективным типом теплогенерирующего оборудования [1].

Однако конденсационная технология предъявляет особые требования к материалам. Конденсат продуктов сгорания имеет кислую реакцию (рН 3-4) и агрессивен по отношению к обычным конструкционным сталям. Поэтому конденсационные теплообменники изготавливаются из нержавеющей сталей, алюминиево-кремниевых сплавов или специальных композитных материалов, устойчивых к коррозии.

Системы автоматического регулирования нового поколения вносят существенный вклад в повышение эффективности. Погодозависимое управление с использованием микропроцессорных контроллеров обеспечивает точное соответствие теплопроизводительности котла текущим потребностям объекта, предотвращая циклические включения-выключения горелки и связанные с ними потери теплоты. Внедрение модулируемых горелок с плавным регулированием мощности в диапазоне 20-100% позволяет поддерживать высокий КПД во всех режимах работы [7].

Немаловажную роль играет качественная теплоизоляция корпуса котла. Современные базальтовые и керамические теплоизоляционные материалы толщиной 50-80 мм снижают потери теплоты через ограждающие конструкции до 1-1,5%, тогда как у устаревших моделей они достигают 4-6% [3].

Внедрение описанных конструктивных решений подтверждается успешными примерами модернизации котельных в различных регионах России. Рассмотрим наиболее показательные проекты последних лет.

В 2023 году в рамках программы энергосбережения муниципального образования проведена модернизация 15 котельных малой мощности в Свердловской области. Замена устаревших котлов на современные конденсационные модели с системами рекуперации теплоты позволила достичь впечатляющих результатов:

- средний КПД оборудования вырос с 79% до 93%;
- расход природного газа снизился на 18%;
- годовая экономия топлива составила 420 тысяч кубометров;
- срок окупаемости проекта оценивается в 4,5 года [6].

Аналогичный опыт накоплен в Республике Татарстан, где был реализован пилотный проект модернизации котельных объектов социальной инфраструктуры. Применение котлов с оребренными теплообменниками и экономайзерами обеспечило повышение КПД до 91-92% при инвестициях, на 30% меньших по сравнению с установкой конденсационного оборудования [2].

Экономическая эффективность модернизации определяется совокупностью факторов. Ключевые показатели представлены в таблице.

Расчеты показывают, что при цене природного газа для промышленных потребителей 8-9 рублей за кубометр (средние показатели 2024 года) годовая экономия от модернизации котла мощностью 100 кВт составляет от 120 до 350 тысяч рублей в зависимости от выбранного технического решения [4].

Важно учитывать не только прямую экономию топлива, но и сопутствующие эффекты. Повышение надежности оборудования снижает затраты на ремонты и внеплановые остановки. Автоматизация процесса управления сокращает трудозатраты обслуживающего персонала. Снижение выбросов вредных веществ позволяет избежать экологических платежей и штрафных санкций.

Таблица 1 – Экономическая эффективность модернизации

Тип модернизации	Прирост КПД, %	Инвестиции, тыс. руб. на 1 кВт	Годовая экономия топлива, %	Срок окупаемости, лет
1	2	3	4	5
Установка экономайзера	5-7	8-12	6-9	5-6
Замена теплообменника на оребренный	3-5	12-18	4-6	6-8
Модернизация горелочного устройства	2-4	15-22	3-5	7-9
Полная замена на конденсационный котел	12-18	35-50	15-22	4-5
Комплексная модернизация с автоматикой	8-12	25-35	10-15	5-7

Тем не менее, следует отметить, что не все устаревшие котлы поддаются модернизации — некоторые из них проще и экономичнее заменить полностью. Решение принимается на основе технического аудита с оценкой остаточного ресурса оборудования, возможности интеграции новых компонентов и соотношения затрат на модернизацию к стоимости нового котла.

Производители котельного оборудования активно развивают направление модульных конструкций, предусматривающих возможность поэтапной модернизации. Такой подход позволяет владельцам котельных распределить инвестиции во времени, начав с наиболее эффективных и быстрокупаемых решений [1].

Государственная поддержка играет существенную роль в стимулировании модернизации. В ряде регионов действуют программы субсидирования до 30-40% затрат на замену неэффективного оборудования. Для предприятий жилищно-коммунального хозяйства предусмотрены льготные условия финансирования проектов энергосбережения через механизм энергосервисных контрактов [7].

Перспективы дальнейшего развития технологий связаны с применением искусственного интеллекта для оптимизации режимов работы котельного оборудования, внедрением систем дистанционного мониторинга и предиктивной диагностики, использованием новых материалов с улучшенными теплофизическими характеристиками. Ожидается, что к 2026 году на российском рынке появятся серийные модели котлов с КПД до 110% и расширенными возможностями интеграции в «умные» системы теплоснабжения [5].

Совершенствование конструкции котлов малой мощности представляет собой актуальную и экономически целесообразную задачу для энергетического сектора Российской Федерации. Анализ современных технических решений показывает реальную возможность повышения КПД котельного оборудования с 78-82% до 91-96%, что обеспечивает сокращение расхода топлива на 10-18%.

Ключевыми направлениями конструктивной модернизации являются оптимизация топочного пространства, применение развитых теплообменных поверхностей, внедрение систем рекуперации теплоты уходящих газов и автоматизация процесса управления. Наиболее эффективным, но и наиболее капиталоемким решением служит применение конденсационных котлов с КПД 105-108%.

Практика модернизации котельных в регионах России демонстрирует сроки окупаемости проектов на уровне 4-8 лет при существенном улучшении экологических показателей и надежности оборудования. Экономическая эффективность повышается при наличии государственной поддержки и применении механизмов энергосервисных контрактов.

Список литературы

8. Бойко, Е. А. Котельные установки : учебное пособие / Е. А. Бойко. — 3-е изд. — Москва, Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. — 668 с.
9. Любимов, П. В. Обзор современных методов и технологий оребрения поверхностей, допускающих свое применение в области интенсификации параметров теплообмена в водогрейных котлоагрегатах / П. В. Любимов. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2023. — № 49 (496). — С. 97-107.
10. Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации / Министерство экономического развития Российской Федерации. М., - 2023. - 155 с.
11. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 010/2011 «О безопасности машин и оборудования». – М.: Стандартинформ, 2023. – 156 с.
12. Лебедев, В.М., Приходько, С.В., Глухов, С.В., Коваленко, А. В. Развитие региональной теплоэнергетики путем реконструкции котельных ТЭЦ малой мощности // Национальные приоритеты России. – 2012. №1 (6). – С. 92-96.
13. Жуйков А. В. Снижение оксидов азота в топках котлов // Журнал СФУ. Техника и технологии. – 2011. №6. – С. 620-627.
14. Тиунова Е.В., Пушкарская М.А., Сырыгина Т.А. Энергосервисные контракты в жилищно-коммунальном хозяйстве // Alfabuild. – 2 (4). 2018. – С. 51-61.

УДК 697.43

УДК 681.52

Пинчук Никита Александрович,
магистрант гр. ТГВм-55а;
Борисов Дмитрий Геннадьевич,
магистрант гр. ЗТГВм-55а;
Долгов Николай Викторович,
к.т.н., доцент, доцент каф. ТТГВ,
ДОННАСА-филиал НИУ МГСУ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНУТРЕДОМОВЫХ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ ЗА СЧЕТ АВТОМАТИЗАЦИИ

В условиях растущих цен на энергоносители и стремления к устойчивому развитию, повышение эффективности систем теплоснабжения зданий становится приоритетной задачей. Данная статья посвящена анализу преимуществ внедрения автоматизированных систем управления (АСУ) в внутридомовых сетях теплоснабжения. Рассматриваются основные компоненты АСУ, их функциональные возможности и принципы работы. Особое внимание уделено потенциалу снижения потерь тепла, оптимизации потребления энергии и повышения комфорта проживания. Подчеркивается важность комплексного подхода при проектировании и интеграции таких систем, а также перспективы развития технологий автоматизации в сфере теплоснабжения.

Ключевые слова: теплоснабжение зданий, внутридомовые системы, автоматизация, энергоэффективность, АСУТП, умный дом, регулирование температуры, снижение потерь тепла, оптимизация потребления, современные технологии.

Современные города сталкиваются с серьезными вызовами в области энергоснабжения. Рост тарифов на энергоресурсы, необходимость снижения воздействия на окружающую среду и повышение уровня комфорта проживания требуют поиска инновационных решений. Традиционные внутридомовые системы теплоснабжения, зачастую, работают в полуавтоматическом или даже ручном режиме, что приводит к значительным потерям энергии и снижению общей эффективности. Неэффективное отопление зданий — это не только прямые финансовые потери для потребителей и ресурсоснабжающих организаций, но и нерациональное использование ценных энергетических ресурсов, а также избыточные выбросы парниковых газов. Происходит это по ряду причин:

Отсутствие динамической регулировки: Большинство систем работают по фиксированным параметрам, не реагируя на изменение наружной температуры, присутствие людей в помещениях или их индивидуальные предпочтения.

Перегрев помещений: вследствие неравномерности тепло распределения и отсутствия точного регулирования, одни помещения могут быть перегреты, в то время как другие остаются недостаточно теплыми. Это ведет к открыванию окон для проветривания, что является прямой потерей тепла [1].

Отсутствие контроля за состоянием системы: Несвоевременное обнаружение утечек, засорений или других проблем в системе теплоснабжения может привести к снижению ее работоспособности и увеличению энергопотребления.

Избыточные потери тепла в трубопроводах: Недостаточная теплоизоляция или отсутствие оптимизации циркуляции теплоносителя так же способствуют потерям.

В связи с этим, повышение эффективности внутридомовых систем теплоснабжения за счет внедрения современных технологий автоматизации становится не просто желательным, а жизненно необходимым шагом на пути к построению энергоэффективных и экологически чистых зданий. Автоматизация позволяет не только оптимизировать потребление энергии, но и значительно повысить уровень комфорта для жильцов, создать условия для дистанционного мониторинга и управления, а также уменьшить эксплуатационные расходы.

Автоматизированные системы управления (АСУ) внутридомовыми системами теплоснабжения представляют собой комплекс технических и программных средств, предназначенных для контроля, регулирования и оптимизации работы отопительных систем. Эти системы позволяют перейти от пассивного потребления тепла к активному управлению им [2].

Ключевые компоненты АСУ:

1. Датчики:

- 1) Наружные датчики температуры: считывают температуру окружающей среды, что позволяет системе прогнозировать необходимую тепловую нагрузку.
- 2) Внутренние датчики температуры (в помещениях): измеряют фактическую температуру в каждой комнате, обеспечивая индивидуальный контроль.
- 3) Датчики давления и расхода теплоносителя: отслеживают параметры потока теплоносителя, позволяя выявлять аномалии и оптимизировать циркуляцию.
- 4) Датчики открытия окон/дверей: Интегрированные датчики могут сигнализировать об открытых окнах, автоматически снижая подачу тепла в данное помещение.
- 5) Датчики влажности: имеют значение для поддержания оптимального микроклимата.

2. Исполнительные механизмы:

- 1) Термостатические клапаны (термоголовки): устанавливаются на радиаторах и автоматически регулируют подачу теплоносителя в зависимости от заданной температуры в помещении.
- 2) Циркуляционные насосы с частотным регулированием: позволяют изменять скорость вращения насоса в зависимости от текущей потребности в теплоносителе, снижая энергопотребление.
- 3) Автоматические балансировочные клапаны: поддерживают заданный расход теплоносителя в контурах системы.
- 4) Запорная и регулирующая арматура с электроприводом: позволяет дистанционно управлять потоками теплоносителя.

3. Контроллер (центральный блок управления):

- 1) "Мозг" системы, собирающий данные с датчиков.
- 2) Обработывает информацию согласно заложенным алгоритмам (например, кривая отопления, зависимости от наружной температуры).
- 3) Отдает команды исполнительным механизмам.
- 4) Может иметь возможность программирования расписания отопления (например, снижение температуры в ночное время или во время отсутствия жильцов).
- 5) Осуществляет диагностику системы.

4. Интерфейс пользователя:

Локальные панели управления: для прямого взаимодействия с системой в здании.

Мобильные приложения и веб-интерфейсы: позволяют дистанционно контролировать и управлять системой, просматривать статистику потребления, настраивать параметры.

Принципы работы:

Базовый принцип работы АСУ заключается в постоянном обмене данными между датчиками и контроллером. Контроллер, анализируя поступающую информацию, сравнивает

ее с заданными целевыми параметрами и, при необходимости, корректирует работу исполнительных механизмов [3-4].

Например, если датчик наружной температуры фиксирует потепление, контроллер может снизить температуру теплоносителя, подаваемого в здание, или уменьшить интенсивность работы циркуляционного насоса. В случае, если датчик температуры в комнате показывает превышение заданного значения, термостатический клапан на радиаторе уменьшит поток теплоносителя. Современные системы могут учитывать не только температуру, но и прогнозы погоды, а также индивидуальные настраиваемые сценарии для каждого помещения или даже для всего здания.

Рынок автоматизированных систем управления для теплоснабжения зданий находится в постоянном развитии. Появляются новые технологии и совершенствуются существующие, что открывает ещё большие горизонты для повышения эффективности.

Основные направления развития:

1) Развитие искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (ML): Алгоритмы ИИ и ML позволяют системам не просто реагировать на текущие условия, но и предсказывать будущие потребности в тепле, учитывая множество факторов, таких как прогноз погоды, расписание движения транспорта, данные о присутствии людей в здании, полученные из других источников (например, датчики движения, Wi-Fi сети). Это позволяет создавать еще более точные и адаптивные системы управления.

2) Интернет вещей (IoT) и облачные технологии: Массовое внедрение IoT-устройств позволяет собирать еще больше данных с различных датчиков, а облачные платформы обеспечивают их хранение, обработку и анализ. Это создает возможности для централизованного управления множеством зданий, создания "умных городов" с интегрированными системами управления энергоресурсами.

3) Беспроводные технологии связи: Развитие беспроводных протоколов (например, LoRaWAN, Zigbee) упрощает монтаж и обслуживание систем, позволяя устанавливать датчики и исполнительные механизмы без прокладки кабелей, что особенно важно для существующих зданий.

4) Интеграция с системами возобновляемой энергетики: Автоматизация позволяет эффективно интегрировать и управлять системами отопления, работающими на основе возобновляемых источников энергии (солнечные коллекторы, тепловые насосы), оптимизируя их работу в сочетании с традиционными источниками.

5) Энергетический менеджмент и BIM-технологии: Встраивание функций энергетического менеджмента в системы автоматизации, а также интеграция с BIM (Building Information Modeling) моделями зданий, позволяют комплексно подходить к проектированию, строительству и эксплуатации, обеспечивая максимальную энергоэффективность на всех этапах жизненного цикла здания [5].

Автоматизация внутридомовых систем теплоснабжения является неотъемлемой частью современного подхода к энергоэффективному строительству и эксплуатации зданий. Она не только способствует значительному снижению потребления энергоресурсов и эксплуатационных расходов, но и повышает комфорт проживания, надежность системы и способствует уменьшению воздействия на окружающую среду. Дальнейшее развитие технологий, в особенности ИИ, IoT и облачных вычислений, открывает новые возможности для создания интеллектуальных, адаптивных и максимально эффективных систем теплоснабжения, что делает их внедрение стратегически важной задачей для всех участников строительного рынка и для общества в целом.

Список литературы

1. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий: Актуализированная редакция СНиП II-3-79*. – [Б. м.]: [б. и.], 2012. – [Дата введения: 2013-01-01].
2. ГОСТ Р 51590-2000. Аккумулирующие тепловые устройства. Общие технические условия. – Введен впервые. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. – 13 с.
3. ГОСТ Р 53587-2009. Системы автоматизации зданий. Общие требования. – Взамен ГОСТ Р 51624-2000; введен впервые. – М.: Стандартиформ, 2009. – 17 с.
4. Авершин, С. Г. Автоматизация систем отопления и вентиляции / С. Г. Авершин, А. И. Волков, А. З. Шубин. – Москва: ИД «Энергетика XXI век», 2010. – 384 с. – ISBN 978-5-903561-57-3.
Терморегулирование в системах отопления: Методические рекомендации / под ред. А. Ю. Сметанина. – Москва: Стройиздат, 1990. – 128 с.
5. Бондаренко, Ю. В. Энергосбережение в тепловых сетях / Ю. В. Бондаренко, А. А. Мастеров, С. А. Баев. – Москва: Энергоатомиздат, 2015. – 240 с. – ISBN 978-5-283-03065-0.
6. Бондаренко, Ю. В. Энергосбережение в тепловых сетях / Ю. В. Бондаренко, А. А. Мастеров, С. А. Баев. – Москва: Энергоатомиздат, 2015. – 240 с. – ISBN 978-5-283-03065-0.

УДК 697.43

Захаров Станислав Викторович,
магистрант гр. ТГВм-55а;
Ступакова Ольга Александровна,
магистрант гр. ЗТГВм-55а;
Долгов Николай Викторович,
к.т.н., доцент каф. ТТГВ,
ДОННАСА-филиала НИУ МГСУ

ПРИМЕНЕНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА ДЛЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Статья посвящена исследованию в области применения возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для теплоснабжения зданий различного функционального назначения и повышению эффективности инженерных систем путем оптимизации их параметров. Важность данного вопроса заключается в том, что несмотря на развитость традиционных систем теплоснабжения, проблема обеспечения их устойчивости и снижения потребления ископаемых ресурсов является одной из наиболее приоритетных задач, приобретающей всё большую актуальность. Это связано с глобальным ростом цен на энергоносители, экологическими требованиями и необходимостью модернизации устаревшего оборудования. Выходом из создавшейся ситуации является проведение технического перевооружения систем теплоснабжения с внедрением тепловых насосов, солнечных коллекторов и установок на биомассе.

Ключевые слова: Возобновляемые источники энергии (ВИЭ), теплоснабжение, тепловые насосы, гелиосистемы, энергоэффективность, декарбонизация, технологическая надежность.

Статья посвящена комплексному исследованию в области применения возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для теплоснабжения зданий различного функционального назначения и повышению эффективности инженерных систем путем глубокой оптимизации их параметров. Важность данного вопроса обусловлена тем, что современная парадигма развития мировой энергетики диктует необходимость радикального пересмотра подходов к генерации и распределению тепловой энергии. Несмотря на то, что существующие традиционные системы теплоснабжения, базирующиеся на ископаемом топливе, обладают отработанной технологической базой, проблема обеспечения их надежности, экологичности и экономической эффективности с каждым годом приобретает всё большую актуальность.

Актуальность исследования подкрепляется глобальным процессом старения централизованных тепловых сетей и возрастающей нагрузкой на существующие газораспределительные и электрические мощности. В условиях нестабильности мировых рынков углеводородов и ужесточения экологических стандартов (включая трансграничное углеродное регулирование), зависимость зданий от ископаемого топлива становится серьезным риском. Продолжающийся рост удельных теплопотерь в жилом и промышленном секторах, а также повышение аварийности на изношенных магистралях требуют поиска альтернативных путей развития.

Выходом из создавшейся ситуации является, прежде всего, переход к децентрализованным и гибридным схемам теплоснабжения, предполагающим проведение масштабной реконструкции и технического перевооружения объектов капитального строительства. Внедрение таких технологий, как высокоэффективные тепловые насосы, вакуумные солнечные коллекторы и автоматизированные биоэнергетические установки,

позволяет не только снизить антропогенную нагрузку на окружающую среду, но и радикально повысить технологическую автономность зданий. Оптимизация параметров систем ВИЭ в сочетании с современными методами тепловой защиты зданий открывает возможность создания объектов с «нулевым» или даже «положительным» энергетическим балансом, что является стратегическим приоритетом для современной строительной отрасли.

Интеграция возобновляемых источников энергии в системы теплоснабжения требует применения высокотехнологичного оборудования, способного трансформировать низкоплотную энергию окружающей среды в стабильный тепловой поток. Основной инженерной задачей здесь является минимизация потерь при преобразовании и обеспечение надежности работы в различных климатических режимах.

Системы теплонасосной трансформации энергии (ТНУ)

Тепловые насосы являются наиболее универсальным технологическим решением, позволяющим использовать термодинамический потенциал различных сред. Работа систем основана на парокомпрессионном цикле, в котором хладагент с низкой температурой кипения переносит теплоту от источника к потребителю [1].

Геотермальные системы с закрытым контуром: Технология базируется на использовании стабильной температуры земной коры. Применяются вертикальные зонды (глубиной до 150–200 м) или горизонтальные коллекторы, уложенные ниже уровня промерзания. Использование специальных тампонажных растворов с высокой теплопроводностью для заполнения скважин позволяет интенсифицировать теплообмен с грунтом. Согласно исследованиям [2], такие системы обеспечивают наиболее высокий сезонный коэффициент энергоэффективности (**SPF**), минимизируя нагрузку на электрические и газовые сети.

Гидротермальные системы (открытый цикл): Технология предусматривает забор грунтовых вод из подающей скважины, прохождение их через теплообменник ТН и сброс в приемную скважину.

Аэротермальные системы с технологией EVI (Enhanced Vapor Injection): Инновационное решение для регионов с холодным климатом. Технология впрыска пара в компрессор позволяет поддерживать высокую температуру теплоносителя при падении температуры наружного воздуха до -30. Оптимизация параметров таких систем включает применение интеллектуальных алгоритмов оттайки испарителя, что предотвращает обледенение и сохраняет эффективность теплообмена.

Гелиотермальные комплексы и системы концентрации

Использование солнечной радиации для теплоснабжения зданий реализуется через прямое преобразование энергии фотонов в кинетическую энергию теплоносителя.

Высокоэффективные вакуумные трубчатые коллекторы: Конструкция «трубка в трубке» с откачанным воздухом создает эффект «термоса», практически полностью исключая конвективные потери тепла. Внутренняя поверхность покрывается многослойным селективным абсорбером, который поглощает не только прямое, но и диффузное излучение. Это позволяет эффективно генерировать тепло даже в пасмурную погоду и зимний период [3].

Системы с тепловыми трубками (Heat Pipes): Внутри каждой стеклянной колбы находится медная трубка с легкокипящей жидкостью. При нагреве жидкость испаряется, поднимается в конденсатор и отдает тепло основному контуру. Данная технология обеспечивает высокую скорость выхода на рабочий режим и защиту системы от перегрева (стагнации).

Интегрированные фазопереходные накопители (PCM-аккумуляторы): Для компенсации суточной неравномерности инсоляции применяются баки-аккумуляторы, заполненные материалами, меняющими фазовое состояние (например, на основе парафинов или солевых гидратов). При плавлении такие материалы запасают в 5–10 раз больше энергии, чем вода, что

позволяет уменьшить габариты оборудования при сохранении высокой теплоаккумулирующей способности [4].

Биоэнергетические установки и технологии газификации

Технологии сжигания биомассы (древесных отходов, сельскохозяйственных пеллет) обеспечивают высокую температуру теплоносителя, необходимую для технологических процессов и классических радиаторных систем отопления.

Пиролизные (газогенераторные) котлы: Реализуют процесс термического разложения древесины при дефиците кислорода. Образующийся пиролизный газ сгорает в отдельной камере при температуре выше

Автоматизированные пеллетные системы с лямбда-зондом: Датчик остаточного кислорода (лямбда-зонд) в реальном времени корректирует подачу воздуха и топлива, обеспечивая оптимальное стехиометрическое соотношение. Это минимизирует расход топлива и предотвращает образование нагара на теплообменных поверхностях [5].

Низкотемпературные системы распределения и рекуперации

Эффективность применения ВИЭ неразрывно связана с оптимизацией систем распределения тепла внутри здания.

Системы «поверхностного» нагрева: Использование капиллярных матов или трубных контуров в стяжке пола и стенах позволяет снизить температуру теплоносителя. Снижение рабочей температуры в системе на каждый градус повышает эффективность теплового насоса на 2–3%.

Теплообменники-утилизаторы серой воды: Технологическое решение, позволяющее извлекать тепловую энергию из сточных вод (душевые, прачечные) и использовать её для предварительного подогрева холодной воды, поступающей в систему ГВС.

Спецификация и эксплуатационные особенности по функциональному назначению зданий

Выбор конкретного технологического решения и его последующая спецификация напрямую зависят от функционального назначения объекта и его теплового профиля. Для жилых зданий индивидуальной застройки наиболее рациональным является применение моноблочных или сплит-систем воздушных тепловых насосов мощностью от 5 до 20 кВт. Эксплуатационной особенностью здесь выступает необходимость интеграции ТН с низкотемпературными контурами (водяными теплыми полами), что позволяет снизить нагрузку на компрессор и увеличить срок его службы.

В сегменте многоквартирных жилых комплексов и крупных административных зданий техническая спецификация смещается в сторону мощных геотермальных каскадных установок (от 100 кВт и выше) с инверторным управлением. Ключевой особенностью эксплуатации в данном случае является обязательное использование баков-аккумуляторов большой емкости, которые выступают в роли гидравлического разделителя и буфера, сглаживающего пики потребления горячей воды в утренние и вечерние часы.

Для объектов социальной инфраструктуры (больницы, гостиницы, спортивные комплексы), характеризующихся круглогодичным высоким потреблением горячей воды, спецификация включает массивы вакуумных солнечных коллекторов, изготовленных из высокопрочного боросиликатного стекла. Специфика их эксплуатации заключается в необходимости настройки системы защиты от стагнации (перегрева) в летний период, что решается либо за счет автоматического слива теплоносителя (drain-back), либо через сброс излишков тепла в грунтовые зонды [6-7].

На удаленных промышленных площадках и складских комплексах, где отсутствует доступ к централизованным газораспределительным сетям, применяются автоматизированные биоэнергетические центры. Их спецификация включает шнековые системы подачи топлива, датчики контроля состава дымовых газов и системы циклонной очистки воздуха. Особенностью эксплуатации таких комплексов является необходимость регулярного контроля качества биотоплива (влажности и зольности), что напрямую влияет на межсервисный интервал оборудования.

Проблема повышения технологической надёжности систем теплоснабжения в условиях износа и старения традиционных газораспределительных сетей требует перехода к использованию высокоэффективных технологических решений в области ВИЭ. Оптимизация технических параметров теплонасосных и гелиотермальных установок, а также их корректная спецификация под нужды конкретного объекта позволяют не только существенно сократить потребление ископаемых ресурсов, но и создать распределенную, отказоустойчивую систему теплоснабжения [8].

Проведение глубокого технического перевооружения зданий с внедрением автоматизированных комплексов на базе биомассы и энергии окружающей среды является ключевым инструментом снижения аварийности и повышения энергетической безопасности. Применение описанных технологий обеспечивает долгосрочную экономическую эффективность, снижает удельные эксплуатационные затраты и гарантирует экологическую устойчивость объектов капитального строительства различного назначения.

Список литературы

1. Рей Д., Макмайл Д. Тепловые насосы: Пер. с англ. — М.: Энергоиздат, 1982. — 224 с. (Термодинамические циклы и рабочие тела ТНУ).
2. Васильев Г. П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев земли. — М.: Граница, 2006. — 176 с. (Методология проектирования геотермальных систем).
3. Даффи Дж. А., Бекман У. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Пер. с англ. под ред. Ю. Н. Малевского. — М.: Мир, 1981. — 744 с. (Расчет радиационных и тепловых балансов гелиоприемников).
4. Табунщиков Ю. А., Бродач М. М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. — М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. — 194 с. (Инженерные методы расчета теплопотребления).
5. Безруких П. П. Использование возобновляемых источников энергии. — М.: Колос, 2008. — 192 с. (Анализ потенциала децентрализованных систем).
6. Харченко Н. В. Индивидуальные солнечные установки. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 208 с. (Практические аспекты монтажа и эксплуатации коллекторов).
7. Амерханов Р. А. Проектирование систем теплоснабжения с использованием возобновляемых источников энергии. — М.: АСВ, 2009. — 200 с.
8. Шишкин Н. Д. Автономные системы теплоснабжения на основе возобновляемых источников энергии. — Астрахань: Изд-во АГТУ, 2005. — 168 с.

УДК 621.643

Савич Дарья Владимировна,
ст. преп. каф. ТТГВ;
Аланин Андрей Анатольевич,
магистрант гр. ЗТГВм-55а каф. ТТГВ;
ДОННАСА-филиал НИУ МГСУ

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ И МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ

В статье рассматривается разработка концепции и методов проектирования распределительных систем газоснабжения. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надёжности, безопасности и энергоэффективности газовых сетей в условиях интенсивной газификации сельских территорий. Представлен системный подход к проектированию, включающий гидравлический расчёт сетей, многокритериальную оптимизацию параметров и компьютерное моделирование. Рассмотрены особенности проектирования для условий Донбасса с учётом климатических и сейсмических факторов. Разработанные методы позволяют создавать эффективные и надёжные системы газоснабжения, отвечающие современным требованиям нормативной базы.

Ключевые слова: распределительные системы газоснабжения, проектирование, гидравлический расчёт, оптимизация, надёжность, безопасность, энергоэффективность, азораспределительные сети.

Современные системы газоснабжения представляют собой сложные инженерные сооружения, обеспечивающие надёжную и безопасную доставку природного газа потребителям. В условиях интенсивной газификации сельских территорий и постоянного роста потребления природного газа актуальность разработки эффективных методов проектирования распределительных систем газоснабжения приобретает особое значение [1].

Распределительные системы газоснабжения включают сети низкого, среднего и высокого давления, газорегуляторные пункты, системы учёта и контроля, а также вспомогательное оборудование. От качества проектирования этих систем напрямую зависит надёжность, безопасность и экономическая эффективность всего газового хозяйства [6].

Современный этап развития газовой отрасли характеризуется внедрением цифровых технологий, автоматизированных систем управления и контроля, а также применением новых материалов и технологий строительства. Это требует разработки и совершенствования методов проектирования, учитывающих современные достижения науки и техники [9].

Концепция проектирования распределительных систем газоснабжения базируется на нескольких ключевых принципах, которые обеспечивают создание эффективных, надёжных и безопасных систем.

Системный подход предполагает рассмотрение газораспределительной сети как единого комплекса, включающего источники газоснабжения, распределительные сети, газорегуляторные пункты и потребителей. При этом учитываются взаимосвязи между всеми элементами системы, а также влияние внешних факторов на её работу [12].

Обеспечение надёжности и безопасности является приоритетной задачей при проектировании распределительных систем газоснабжения. Это достигается путём применения современных материалов и технологий строительства, использования резервирования критически важных элементов системы, внедрения систем автоматического контроля и управления, обеспечения соответствия требованиям нормативных документов [10].

Энергоэффективность распределительных систем газоснабжения достигается путём минимизации потерь давления в сетях, оптимизации параметров сети для снижения

эксплуатационных затрат, применения энергосберегающего оборудования и использования систем рекуперации энергии [11].

Модульность и масштабируемость позволяют создавать гибкие системы, которые могут легко адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации. Это достигается путём применения унифицированных элементов и узлов, создания модульной структуры системы и обеспечения возможности поэтапного развития сети [15].

Создание единой информационной модели системы для эффективного управления достигается путём внедрения геоинформационных систем (ГИС), создания цифровых двойников газораспределительных сетей и использования систем автоматизированного проектирования (САПР) [18].

Рассмотрим подробнее методы проектирования распределительных систем.

Расчётные методы

Основным методом проектирования распределительных систем газоснабжения является гидравлический расчёт, который включает определение расчётных расходов газа, гидравлический расчёт сетей и учёт местных сопротивлений [8].

Определение расчётных расходов газа выполняется на основе нормативного потребления и коэффициентов одновременности

$$V_{\text{расч}} = \Sigma(V_{\text{ном}} \cdot K_{\text{одн}}), \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (1)$$

где $V_{\text{ном}}$ — номинальный расход газа прибором, $\text{м}^3/\text{ч}$; $K_{\text{одн}}$ — коэффициент одновременности.

Гидравлический расчёт сетей с использованием формулы падения давления

$$\Delta P = \lambda \cdot (L \cdot \rho \cdot v^2) / (2 \cdot d), \text{ Па}, \quad (2)$$

где λ — коэффициент гидравлического трения;

L — длина участка, м;

ρ — плотность газа, $\text{кг}/\text{м}^3$;

v — скорость газа, $\text{м}/\text{с}$;

d — внутренний диаметр трубы, м.

Учёт местных сопротивлений путём увеличения фактической длины газопровода на 5–10%.

Методы оптимизации

Для повышения эффективности проектирования применяются методы многокритериальной оптимизации, учитывающие:

Надёжность — вероятность безотказной работы системы;

Стоимость — капитальные и эксплуатационные затраты;

Эксплуатационные риски — вероятность аварийных ситуаций.

Оптимизация параметров сети осуществляется по критерию минимума приведённых затрат

$$З_{\text{пр}} = K + E_n \cdot C, \text{ руб/год}, \quad (3)$$

где K — капитальные вложения, руб; C — годовые эксплуатационные расходы, руб/год; E_n — нормативный коэффициент эффективности.

Компьютерное моделирование

Современные методы проектирования включают использование специализированного программного обеспечения для гидравлического моделирования, оптимизации параметров и анализа надёжности. Для моделирования распределительных систем газоснабжения применяются программные комплексы: GASPIPE, PIPE-FLO, AutoPIPE, CAESAR II [19].

Современные тенденции в проектировании распределительных систем газоснабжения

Применение полиэтиленовых труб

Полиэтиленовые трубы получили широкое распространение при строительстве газопроводов низкого и среднего давления благодаря высокой коррозионной стойкости, длительному сроку службы (до 50 лет), простоте монтажа и низкой стоимости по сравнению со стальными трубами [20].

Бестраншейные технологии прокладки

Бестраншейные технологии прокладки газопроводов позволяют минимизировать нарушение благоустройства территории и снизить воздействие на окружающую среду. Основные методы включают горизонтальное направленное бурение (ГНБ), продавливание, прокалывание и санацию [17].

Автоматизация и телемеханика

Современные системы газоснабжения оснащаются системами автоматизации и телемеханики, которые позволяют дистанционно управлять запорной арматурой, контролировать параметры работы сети, автоматически регулировать режимы работы и выявлять утечки газа [16].

Заключение

Разработка концепции и методов проектирования распределительных систем газоснабжения является актуальной задачей, решение которой позволит повысить надёжность, безопасность и экономическую эффективность газового хозяйства. Современные методы проектирования, основанные на системном подходе, оптимизации параметров и использовании компьютерного моделирования, позволяют создавать эффективные и надёжные системы газоснабжения, отвечающие требованиям современного строительства и эксплуатации.

Ключевыми направлениями развития методов проектирования являются цифровизация проектирования, внедрение цифровых двойников газораспределительных сетей и использование облачных технологий. Применение искусственного интеллекта и методов машинного обучения открывает новые возможности для оптимизации параметров, прогнозирования потребления и выявления аномалий в работе систем. Развитие адаптивных систем управления, способных автоматически адаптироваться к изменяющимся условиям работы сети, повышает надёжность и эффективность газоснабжения. Интеграция с другими инженерными системами и создание комплексных решений для совместного проектирования систем газоснабжения, теплоснабжения и электроснабжения позволяют достичь синергетического эффекта. Экологизация проектирования, учитывающая экологические факторы при выборе трасс, материалов и технологий строительства, соответствует современным требованиям устойчивого развития.

Перспективными направлениями исследований в области проектирования распределительных систем газоснабжения являются разработка методов проектирования для условий вечной мерзлоты и сейсмически активных районов, создание систем прогнозирования и предотвращения аварийных ситуаций, разработка методов оптимизации параметров сетей с учётом неопределённости исходных данных и создание интегрированных систем проектирования, объединяющих все этапы жизненного цикла газораспределительных сетей.

Список литературы

1. Блюменкранц Б.А. Монтаж вентиляционных систем: справочник монтажника / Б.А. Блюменкранц, А.С. Павлов, А.Д. Рыжак [и др.]; под ред. И.Г. Староверова. — М.: Стройиздат, 1978. — 591 с.
2. Галдин В.Д. Горючие газы. Добыча, транспортировка, получение: учебное пособие / В.Д. Галдин. — М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. — 216 с. — ISBN 978-5-9729-2087-7.

3. ГОСТ 21.602-2016. Система проектной документации для строительства. Отопление, вентиляция и кондиционирование. — Введ. 2017-07-01. — М.: Стандартинформ, 2016. — 48 с.
4. ГОСТ 3262-75. Трубы стальные водогазопроводные. Технические условия. — Введ. 1977-01-01. — М.: Изд-во стандартов, 1987. — 16 с.
5. ГОСТ 5542-2014. Газ природный промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. — Введ. 2015-07-01. — М.: Стандартинформ, 2014. — 24 с.
6. ГОСТ Р 55990-2014. Сети газораспределительные. Требования к эксплуатации. — Введ. 2015-07-01. — М.: Стандартинформ, 2014. — 16 с.
7. Журавлев В.А. Справочник мастера вентиляционника / В.А. Журавлев. — М.: Стройиздат, 1983. — 336 с.
8. Кобзарь А.В. Газоснабжение района города: учебное пособие / сост. А.В. Кобзарь, А.А. Еськин, Н.С. Ткач. — Владивосток: Инженерная школа ДВФУ, Дальневосточный федеральный университет, 2013. — 65 с.
9. Кудинов А.А. Транспортирование, распределение и использование природного газа: практикум / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина, К.Р. Хусаинов. — 2-е изд. — Самара: Самарский государственный технический университет, 2020. — 45 с.
10. Правила безопасности сетей газораспределения и газопотребления: утв. постановлением Госгортехнадзора России от 18.03.2003 № 9. — М.: Госгортехнадзор России, 2003. — 160 с.
11. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов / Е.Я. Соколов. — 7-е изд., стер. — М.: Изд-во МЭИ, 2001. — 472 с.
12. СП 42-101-2003. Общие положения по проектированию и строительству газораспределительных систем из металлических и полиэтиленовых труб. — М.: ЗАО «Полимергаз», 2004. — 166 с.
13. СП 402.1325800.2018. Здания жилые. Правила проектирования систем газопотребления. — Введ. 2019-06-18. — М.: Минстрой России, 2018. — 80 с.
14. СП 62.13330.2011*. Газораспределительные системы. Актуализированная редакция СНиП 42-01-2002. — Введ. 2012-05-20. — М.: Минрегион России, 2011. — 132 с.
15. СП 89.13330.2016. Котельные установки. Актуализированная редакция СНиП II-35-76. — Введ. 2017-06-04. — М.: Минстрой России, 2016. — 112 с.
16. СП 124.13330.2012. Тепловые сети. Актуализированная редакция СНиП 41-02-2003. — Введ. 2013-01-01. — М.: Минрегион России, 2012. — 120 с.
17. СП 131.13330.2025. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. — Введ. 2026-01-01. — М.: Минстрой России, 2025. — 144 с.
18. СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89*. — Введ. 2017-06-04. — М.: Минстрой России, 2016. — 160 с.
19. Сосков В.И. Технология монтажа и заготовительные работы / В.И. Сосков. — М.: Высшая школа, 1989. — 339 с.
20. Яковлев Б.В. Теплофикация и тепловые сети: учебное пособие по практическим занятиям и курсовому проектированию / Б.В. Яковлев, Ю.Б. Яковлев. — Минск: Белэнергосбережение, 2003. — 125 с.

УДК 621.643.6

Савич Дарья Владимировна,
ст. преп. каф. ТТГВ;
Кубрин Алексей Николаевич,
магистрант гр. ОЗТГВм-55а;
Старцев Богдан Русланович,
магистрант гр. ТГВм-55а,
ДОННАСА-филиала НИУ МГСУ

РАЗРАБОТКА УПРАВЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ

В статье рассматривается разработка управляющих устройств в распределительных системах газоснабжения. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надёжности, безопасности и энергоэффективности газовых сетей. Рассмотрены основные типы управляющих устройств: регуляторы давления, запорная арматура, предохранительные устройства и системы автоматизации. Представлены современные методы проектирования и оптимизации параметров управляющих устройств, включая гидравлический расчёт, многокритериальную оптимизацию и компьютерное моделирование. Описаны тенденции развития управляющих устройств, включая цифровизацию, применение беспроводных технологий и Интернета вещей. Разработанные методы позволяют создавать эффективные и надёжные системы управления, отвечающие современным требованиям нормативной базы.

Ключевые слова: распределительные системы газоснабжения, управляющие устройства, регуляторы давления, запорная арматура, предохранительные устройства, автоматизация, оптимизация, надёжность, безопасность, цифровизация.

Распределительные системы газоснабжения представляют собой сложные инженерные сооружения, обеспечивающие надёжную и безопасную доставку природного газа потребителям. Эффективность и безопасность работы таких систем во многом определяются качеством управляющих устройств, которые обеспечивают контроль параметров газа, регулирование режимов работы и защиту оборудования от аварийных ситуаций. Современные распределительные системы газоснабжения характеризуются высокой степенью автоматизации, применением цифровых технологий и интеллектуальных систем управления. Это требует разработки и внедрения современных управляющих устройств, отвечающих требованиям надёжности, безопасности и энергоэффективности [6].

Актуальность разработки управляющих устройств обусловлена необходимостью повышения надёжности газораспределительных сетей, снижения потерь газа, обеспечения безопасной эксплуатации и соответствия современным требованиям нормативной документации.

Управляющие устройства в распределительных системах газоснабжения можно классифицировать по нескольким признакам.

По назначению выделяют регулирующие устройства, включая регуляторы давления и регуляторы расхода; запорные устройства, такие как задвижки, краны и клапаны; предохранительные устройства, в том числе предохранительные и сбросные клапаны; а также контрольно-измерительные приборы, к которым относятся манометры, расходомеры и газоанализаторы.

По принципу действия управляющие устройства подразделяются на механические, пневматические, электрические и электронные.

По способу управления различают ручные, автоматические и дистанционные устройства [9].

Регуляторы давления являются основными управляющими устройствами в распределительных системах газоснабжения. Они обеспечивают стабилизацию давления газа на заданном уровне независимо от изменения расхода и входного давления. Регуляторы давления состоят из чувствительного элемента, в качестве которого выступает мембрана или поршень, исполнительного механизма в виде клапана, задающего устройства, представленного пружиной или пневматическим приводом, а также дроссельных устройств. Принцип действия регулятора давления основан на уравнивании сил, действующих на чувствительный элемент. При изменении выходного давления происходит перемещение мембраны, которое через исполнительный механизм изменяет положение клапана, обеспечивая стабилизацию давления [7].

По принципу действия регуляторы давления подразделяются на устройства прямого действия, не требующие использования вспомогательной энергии, и непрямого действия, использующие вспомогательную энергию. По диапазону регулируемых давлений различают регуляторы высокого, среднего и низкого давления. При выборе регуляторов давления необходимо учитывать диапазон входных и выходных давлений, расход газа, тип газа, климатические условия эксплуатации и требования к точности регулирования [11].

Запорная арматура предназначена для полного открытия или закрытия потока газа в трубопроводе. Основными типами запорной арматуры в газораспределительных системах являются шаровые краны, задвижки и клапаны.

Шаровые краны являются наиболее распространённым типом запорной арматуры в системах газоснабжения благодаря своей надёжности, герметичности и простоте управления. Принцип действия основан на вращении шарового затвора с отверстием на девяносто градусов.

Задвижки применяются на магистральных газопроводах и в газораспределительных станциях, обеспечивая полное открытие или закрытие потока газа и характеризуясь высокой пропускной способностью.

Клапаны используются для регулирования и отсечки потока газа и могут быть оснащены ручным, электрическим или пневматическим приводом [3].

Запорная арматура должна соответствовать следующим требованиям: обеспечивать полную герметичность в закрытом состоянии, иметь минимальное гидравлическое сопротивление в открытом состоянии, обладать надёжностью и долговечностью, а также быть удобной в эксплуатации и обслуживании. Эти требования закреплены в нормативной документации и являются обязательными при проектировании и эксплуатации газораспределительных систем [10].

Предохранительные устройства предназначены для защиты оборудования и трубопроводов от превышения допустимого давления. Основными типами предохранительных устройств являются предохранительные клапаны, предохранительно-запорные клапаны и сбросные клапаны.

Предохранительные клапаны автоматически открываются при превышении заданного давления и сбрасывают избыточный газ в атмосферу или в специальную систему. После снижения давления до нормального значения клапан закрывается.

Предохранительно-запорные клапаны при превышении или понижении заданного давления полностью перекрывают поток газа. Для возобновления подачи газа требуется ручное включение клапана.

Сбросные клапаны предназначены для сброса избыточного давления в атмосферу или в специальную систему и применяются в газорегуляторных пунктах и установках [2].

Современные распределительные системы газоснабжения оснащаются системами автоматизации и телемеханики, которые обеспечивают диспетчерское управление, автоматическое регулирование и системы безопасности.

Системы диспетчерского управления позволяют контролировать параметры работы газораспределительной сети в реальном времени, управлять оборудованием на расстоянии и оперативно реагировать на аварийные ситуации.

Системы автоматического регулирования поддерживают заданные параметры работы сети, такие как давление и расход, без участия оператора. Они используют данные от датчиков и управляют исполнительными механизмами для поддержания оптимальных режимов работы.

Системы безопасности включают сигнализацию о превышении параметров, автоматическое отключение оборудования при аварийных ситуациях, системы обнаружения утечек газа и системы пожарной сигнализации и пожаротушения.

Телемеханические системы обеспечивают передачу данных от удалённых объектов на центральный пульт управления, включая датчики измерения параметров, каналы связи и аппаратуру приёма и обработки данных [16].

Развитие управляющих устройств в распределительных системах газоснабжения характеризуется рядом современных тенденций.

Цифровизация позволяет создавать интеллектуальные системы управления, обеспечивающие более точное регулирование параметров, прогнозирование аварийных ситуаций и оптимизацию режимов работы. Применение беспроводных технологий, таких как GSM, LoRaWAN и NB-IoT, позволяет создавать распределённые системы мониторинга и управления без прокладки кабельных линий, что особенно актуально для удалённых объектов.

Технологии Интернета вещей позволяют объединять различные управляющие устройства в единую сеть, обеспечивая комплексный мониторинг и управление распределительной системой газоснабжения.

Разработка энергонезависимых устройств, работающих без внешнего источника питания, повышает надёжность систем газоснабжения, особенно в условиях отсутствия гарантированного электроснабжения.

Использование современных материалов, таких как композиты, полимеры и коррозионностойкие стали, повышает долговечность и надёжность управляющих устройств, снижает их вес и упрощает монтаж [1].

Разработка управляющих устройств в распределительных системах газоснабжения является важным направлением, обеспечивающим надёжность, безопасность и эффективность работы газораспределительных сетей. Современные управляющие устройства характеризуются высокой степенью автоматизации, применением цифровых технологий и интеллектуальных систем управления. Перспективными направлениями развития управляющих устройств являются внедрение цифровых двойников газораспределительных сетей, применение искусственного интеллекта для прогнозирования и предотвращения аварийных ситуаций, разработка адаптивных систем управления, способных автоматически настраиваться под изменяющиеся условия работы сети, а также интеграция систем газоснабжения с другими инженерными системами в рамках концепции «умных городов».

Дальнейшее совершенствование управляющих устройств позволит повысить надёжность и безопасность распределительных систем газоснабжения, снизить эксплуатационные затраты и обеспечить устойчивое энергоснабжение потребителей.

Список литературы

1. Блюменкранц Б.А. Монтаж вентиляционных систем: справочник монтажника / Б.А. Блюменкранц, А.С. Павлов, А.Д. Рыжак [и др.]; под ред. И.Г. Староверова. — М.: Стройиздат, 1978. — 591 с.
2. Галдин В.Д. Горючие газы. Добыча, транспортировка, получение: учебное пособие / В.Д. Галдин. — М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. — 216 с. — ISBN 978-5-9729-2087-7.
3. ГОСТ 21.602-2016. Система проектной документации для строительства. Отопление, вентиляция и кондиционирование. — Введ. 2017-07-01. — М.: Стандартинформ, 2016. — 48 с.
4. ГОСТ 3262-75. Трубы стальные водогазопроводные. Технические условия. — Введ. 1977-01-01. — М.: Изд-во стандартов, 1987. — 16 с.
5. ГОСТ 5542-2014. Газ природный промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. — Введ. 2015-07-01. — М.: Стандартинформ, 2014. — 24 с.
6. ГОСТ Р 55990-2014. Сети газораспределительные. Требования к эксплуатации. — Введ. 2015-07-01. — М.: Стандартинформ, 2014. — 16 с.
7. Журавлев В.А. Справочник мастера вентиляционника / В.А. Журавлев. — М.: Стройиздат, 1983. — 336 с.
8. Кобзарь А.В. Газоснабжение района города: учебное пособие / сост. А.В. Кобзарь, А.А. Еськин, Н.С. Ткач. — Владивосток: Инженерная школа ДВФУ, Дальневосточный федеральный университет, 2013. — 65 с.
9. Кудинов А.А. Транспортирование, распределение и использование природного газа: практикум / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина, К.Р. Хусаинов. — 2-е изд. — Самара: Самарский государственный технический университет, 2020. — 45 с.
10. Правила безопасности сетей газораспределения и газопотребления: утв. постановлением Госгортехнадзора России от 18.03.2003 № 9. — М.: Госгортехнадзор России, 2003. — 160 с.
11. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов / Е.Я. Соколов. — 7-е изд., стер. — М.: Изд-во МЭИ, 2001. — 472 с.
12. СП 42-101-2003. Общие положения по проектированию и строительству газораспределительных систем из металлических и полиэтиленовых труб. — М.: ЗАО «Полимергаз», 2004. — 166 с.
13. СП 402.1325800.2018. Здания жилые. Правила проектирования систем газопотребления. — Введ. 2019-06-18. — М.: Минстрой России, 2018. — 80 с.
14. СП 62.13330.2011*. Газораспределительные системы. Актуализированная редакция СНиП 42-01-2002. — Введ. 2012-05-20. — М.: Минрегион России, 2011. — 132 с.
15. СП 89.13330.2016. Котельные установки. Актуализированная редакция СНиП II-35-76. — Введ. 2017-06-04. — М.: Минстрой России, 2016. — 112 с.
16. СП 124.13330.2012. Тепловые сети. Актуализированная редакция СНиП 41-02-2003. — Введ. 2013-01-01. — М.: Минрегион России, 2012. — 120 с.
17. СП 131.13330.2025. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. — Введ. 2026-01-01. — М.: Минстрой России, 2025. — 144 с.
18. СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89*. — Введ. 2017-06-04. — М.: Минстрой России, 2016. — 160 с.
19. Сосков В.И. Технология монтажа и заготовительные работы / В.И. Сосков. — М.: Высшая школа, 1989. — 339 с.
20. Яковлев Б.В. Теплофикация и тепловые сети: учебное пособие по практическим занятиям и курсовому проектированию / Б.В. Яковлев, Ю.Б. Яковлев. — Минск: Белэнергосбережение, 2003. — 125 с.

УДК 628.161.3

Зайченко Людмила Геннадьевна,
к.т.н., доцент каф. ВВ и ОВР;
Куценко Татьяна Николаевна,
ст. преп.каф. ВВ и ОВР;
Донцов Максим Игоревич,
магистрант гр. ВВм-52а,
ДОННАСА - филиал НИУ МГСУ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ БЕСТРАНШЕЙНОЙ ПРОКЛАДКИ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ВОДОПРОВОДНОЙ СЕТИ

Рассматривается проблема критического износа водопроводных сетей. Установлено, что применение бестраншейных технологий позволяет сократить прямые затраты на 30-60%, уменьшить сроки производства работ в 3-5 раз и минимизировать социальный ущерб городской инфраструктуре. Разработан алгоритм выбора оптимальной технологии реконструкции, учитывающий геотехнические условия, диаметр трубопровода и экономические ограничения. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и модернизации систем водоснабжения в условиях плотной городской застройки.

Ключевые слова: бестраншейные технологии, реконструкция водопровода, экономическая эффективность, износ сетей, городская инфраструктура.

Введение. Прокладки трубопроводов и реконструкции водопроводных сетей является важной задачей для обеспечения надежного и бесперебойного водоснабжения населения, а также для предотвращения экологических и экономических последствий аварий. Для решения этой задачи применяются различные технологические решения, которые зависят от типа повреждений, состояния трубопровода, геологических условий и бюджета проекта.

Основной материал. Проблема износа инженерных инфраструктур является одной из наиболее острых для современного жилищно-коммунального хозяйства России. По данным Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ, износ водопроводных сетей в стране достигает критических значений – в среднем 60-70%, а в отдельных регионах превышает 80%. Ежегодно происходит более 100 тысяч аварий на системах водоснабжения, что приводит к значительным экономическим потерям, перебоям в подаче воды потребителям и ухудшению экологической обстановки.

Традиционные методы реконструкции и прокладки трубопроводов водопроводных сетей, основанные на открытом способе прокладки (рытьё траншей), характеризуются рядом существенных недостатков:

- высокая трудоёмкость и материалоёмкость земляных работ;
- длительные сроки выполнения работ (в 3-5 раз превышающие сроки бестраншейных методов);
- значительное нарушение благоустройства городских территорий, дорожного покрытия, зелёных насаждений;
- перекрытие движения транспорта и пешеходных потоков, создание заторов;
- риск повреждения существующих подземных коммуникаций;
- высокие затраты на восстановление поверхности (до 30-40% от общей стоимости проекта);
- негативное воздействие на окружающую среду (шум, пыль, вибрация, большие объёмы грунта).

В условиях плотной городской застройки, интенсивного транспортного движения и насыщенности подземного пространства инженерными коммуникациями применение открытых методов становится всё более проблематичным, а зачастую и невозможным.

Бестраншейные технологии представляют собой современную альтернативу традиционным методам строительства и реконструкции подземных коммуникаций. Данные технологии позволяют выполнять прокладку, замену и восстановление трубопроводов без масштабных земляных работ, минимизируя воздействие на поверхность и окружающую инфраструктуру.

К основным методам бестраншейной прокладки и реконструкции относятся:

- горизонтально-направленное бурение (ГНБ) – для прокладки новых трубопроводов;
- микротоннелирование – для точной прокладки самотечных систем;
- Pipe Bursting – для замены старых труб с одновременным их разрушением;
- CIPP (Cured-In-Place Pipe) – для санации трубопроводов полимерными материалами;
- продавливание (Pipe Jacking) – для прокладки труб большими диаметрами;
- горизонтальный прокол и пневмопробойники – для малых диаметров и коротких участков.

Бестраншейные технологии представляют собой группу методов строительства и реконструкции подземных коммуникаций без вскрытия поверхности. Выбор оптимального метода требует детального сравнения их технических, экономических и эксплуатационных характеристик (таблица 1, таблица 2).

Неправильный выбор технологии может привести к серьезным проблемам: повреждению существующих коммуникаций, деформации поверхности, авариям и даже человеческим жертвам.

Таблица 1 – Сравнение технических параметров

Метод	Диаметр, мм	Длина	Глубина, м	Точность, мм
1	2	3	4	5
ГНБ	50-1400	40-1800	2-50	±50-100
Микротоннелирование	250-3000	25-400	3-60	±10-30
Продавливание	400-2000	50-150	4-40	±20-50
Горизонтальный прокол	50-500	15-100	1-15	±100-150
Пневмопробойники	50-400	10-60	1-8	±150-200
Pipe Bursting	80-1200	30-200	1,5-10	±50
CIPP	50-2000	10-500	1-20	–

Таблица 2 – Преимущества и недостатки

Метод	Преимущества	Недостатки
1	2	3
ГНБ	Большая длина прокладки Различные диаметры Возможность изменения траектории Минимальные котлованы	Требуется пространства для установки Ограниченная точность Риск потери бурового раствора Не подходит для самотека

Продолжение таблицы 2

1	2	3
Микротоннелирование	Высокая точность Любые диаметры Безопасность (дистанционное управление) Стабильность забоя	Высокая стоимость оборудования Требуется больших шахт Медленная скорость Сложная логистика
Продавливание	Простота технологии Большие диаметры Относительно низкая стоимость	Ограниченная длина Риск осадки поверхности Требуется мощных домкратов Не в плывунах
Pipe Bursting	Увеличение диаметра возможно Не нужна очистка старой трубы Быстрая установка Бесстыковая труба	Требуется два котлована Вибрация при работе Риск повреждения соседних коммуникаций Ограничения по материалу старой трубы
CIPP	Без разрушения старой трубы Высокая скорость Коррозионная стойкость Герметичность	Уменьшение диаметра Ограничения по температуре Сложность контроля качества

Разработан алгоритм выбора оптимальной технологии бестраншейной реконструкции, учитывающий геотехнические условия, диаметр трубопровода и экономические ограничения. Алгоритм выбора метода:

1. Определение требований проекта
2. Анализ геотехнических условий
3. Проверка технических ограничений (диаметр, длина, глубина)
4. Исключение неподходящих методов
5. Оценка оставшихся методов по критериям:
 - Техническая применимость
 - Экономическая эффективность
 - Временные рамки
 - Доступность ресурсов
6. Выбор оптимального метода
7. Детальное проектирование

Проведённое исследование подтверждает высокую эффективность внедрения бестраншейных технологий для оптимизации реконструкции водопроводных сетей. На основе анализа технических, экономических и экологических показателей сформулированы следующие основные выводы и рекомендации.

Технико-экономическая эффективность

Применение бестраншейных методов позволяет сократить прямые затраты на строительство и реконструкцию трубопроводов на 30-60% по сравнению с традиционным открытым способом. Основная экономия формируется за счёт снижения объёмов земляных работ, минимизации затрат на восстановление благоустройства (дорожные покрытия, зеленые насаждения) и сокращения сроков производства работ в 3-5 раз. Практические примеры

подтверждают рентабельность методов даже при высокой стоимости специализированного оборудования.

Социально-экологический эффект

Бестраншейные технологии обеспечивают значительное снижение негативного воздействия на городскую среду (таблица 3). Зафиксировано отсутствие масштабных перекрытий дорог, сохранение транспортных потоков, минимизация шума, пыли и вибрации. В условиях плотной городской застройки и исторических центров это является критическим фактором принятия решений. Объемы отходов грунта снижаются в десятки раз (с 3000-5000 м³/км до 50-150 м³/км при ГНБ).

Обоснованность выбора технологии

Не существует универсального метода бестраншейной прокладки. Выбор технологии должен осуществляться на основе многокритериального анализа. Рекомендованы следующие приоритеты:

Для напорных сетей средней и большой длины (>100 м) оптимально ГНБ.

Для самотечных коллекторов больших диаметров (>1000 мм) и сложных грунтов – микротоннелирование.

Для замены изношенных труб с увеличением пропускной способности в стесненных условиях – Pipe Bursting.

Для локального восстановления герметичности без замены трубы – CIPP-санация.

Для малых диаметров и коротких участков – пневмопробойники.

Таблица 3 – Воздействие на окружающую среду

Критерий	ГНБ	Микротоннелирование	Pipe Bursting	CIPP	Открытый способ
1	2	3	4	5	6
Нарушение поверхности, %	5-10	10-15	10-15	5-10	100
Шум, ДБ	65-75	70-80	75-85	60-70	80-95
Вибрация	Низкая	Низкая	Средняя	Отсутствует	Высокая
Выбросы CO ₂ , т/км	15-25	25-40	20-30	10-20	40-60
Отходы грунта, м ³ /км	50-150	200-400	20-50	10-30	3000-5000

Основными препятствиями для массового применения бестраншейных технологий в РФ остаются высокая стоимость специализированного оборудования, дефицит квалифицированных операторов и недостаточная нормативная база для некоторых инновационных методов. Решение этих проблем требует инвестиций в обучение персонала, локализацию производства оборудования и актуализацию строительных норм (СП, ГОСТ).

Для успешной оптимизации реконструкции водопроводных сетей рекомендуется:

- обязательное рассмотрение бестраншейных альтернатив на стадии проектирования для всех объектов в городской черте;
- проведение тщательной предварительной диагностики существующих сетей (телеинспекция) для исключения рисков;
- внедрение систем мониторинга качества работ в реальном времени;
- развитие государственно-частного партнёрства для финансирования дорогостоящих технологий реконструкции.

Анализ возможностей различных методов бестраншейного восстановления напорных трубопроводов свидетельствует, что не существует универсального подхода к их ремонту или замене. Каждый из предложенных бестраншейных методов ограничен соответствующими рамками применения, которые должны удовлетворять сложившимся техническим условиям на различных объектах, а также материальным и другим возможностям эксплуатирующих сети организаций. Критерием принятия решений по конкретным объектам восстановления, а также оптимальным методам их реализации должна служить научно обоснованная стратегия реновации водопроводных сетей.

Выводы. Внедрение бестраншейных технологий является не просто технической модернизацией, а стратегическим шагом к повышению надёжности жилищно-коммунальной инфраструктуры, устойчивому развитию городов и повышению качества жизни населения. Дальнейшее развитие отрасли связано с цифровизацией процессов (BIM-моделирование, мониторинг состояния труб в реальном времени), внедрением роботизированных комплексов, разработкой новых композитных материалов для труб и лайнеров, а также созданием гибридных технологий, сочетающих преимущества различных методов.

Список литературы

1. СП 31.13330.2021. Свод правил. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения : актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84* : издание официальное : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 27 декабря 2021 г. № 1016/пр : дата введения 2022-01-28 / разработан ФГБУ НИИСК РААСН. – Москва : Стандартинформ, 2025. – 159 с. – Текст : непосредственный.
2. Оценка технического состояния сетей и сооружений систем водоснабжения : методические указания / — Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2012. — 148 с. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/19024.html> (дата обращения: 04.02.2026).
3. Сомов М. А., Журба М. Г. Водоснабжение. Том 1. Системы забора, подачи и распределения воды. Учебник для вузов. – М. : Издательство АСВ, 2008. – 2008 – 262 с, ил. – ISBN 978-5-93093-565-3.
4. Хренов К. Е. Разработка мероприятий по обеспечению энергосбережения на водопроводных сетях, восстанавливаемых внутренними защитными покрытиями [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.04 / науч. рук. В. А. Орлов ; Моск. гос. строит. ун-т. – Москва, 2016. – 203 с. Режим доступа: http://mgsu.ru/science/Dissoveti/Zashita_dissert/hrenovkonstantin-evgenirvich/Dissertaciya_Hrenov_KE.pdf.
5. СП 450.1325800.2019. Инженерные сети подземные. Бестраншейные методы прокладки и реконструкции. Общие правила производства работ. — М.: Стандартинформ, 2020. — 45 с.
6. Орлов В. А. Бестраншейные технологии строительства и восстановления трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения / В. А. Орлов. – М. : Издательство АСВ, 2024. — 228 с., ISBN: 978-5-9729-1585-9.
7. Орлов В. А. Строительство, реконструкция и ремонт водопроводных и водоотводящих сетей бестраншейными методами / В. А. Орлов, Е. В. Орлов. - М. : Издательство АСВ, 2025. — 221 с., ISBN: 978-5-16-012603-6.
8. Рогов С. А. Сравнительный анализ эффективности бестраншейных методов реконструкции водопроводных сетей / С. А. Рогов // Вестник гражданских инженеров. — 2022. — № 3 (92). — С. 145-152.

УДК 628.1

Зайченко Людмила Геннадьевна,
к.т.н., доцент каф. ВВ и ОВР;
Витязь Елена Николаевна,
Царенкова Полина Александровна,
магистранты гр. ОЗВВМ-55а,
ДОННАСА - филиал НИУ МГСУ

НЕУЧТЕННЫЕ РАСХОДЫ В СИСТЕМАХ КОММУНАЛЬНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

Выполнен комплексный анализ причин возникновения неучтенных расходов в системах коммунального водоснабжения и водоотведения, среди которых выделяются как объективные факторы (физический износ инфраструктуры, технические сбои), так и субъективные причины (недостаточный уровень контроля, халатность персонала, противоправные действия потребителей). Представлены результаты анализа по минимизации неучтенных расходов, рассмотрены перспективные технологии и технические решения. Особое внимание уделяется экономическим и экологическим последствиям неучтенного водопользования.

Ключевые слова: система водоснабжения, система водоотведения, потери воды, неучтённые расходы.

Введение. Эффективность работы систем коммунального водоснабжения и водоотведения является одним из ключевых показателей устойчивого развития городской инфраструктуры. В современных условиях, характеризующихся ростом тарифов на энергоносители и ужесточением экологических норм, проблема неучтенных расходов (потерь) воды выходит на первый план.

Основной материал. Системы коммунального водоснабжения и водоотведения представляют собой сложные инженерные сооружения, эффективность функционирования которых во многом определяет качество жизни населения и состояние окружающей среды. Одной из наиболее острых проблем в данной сфере являются неучтенные расходы воды, которые в среднем составляют 15-25% от общего объема подачи.

Неучтенные расходы – это разница между объемом воды, поданной в распределительную сеть, и объемом воды, оплаченной потребителями. Высокий уровень неучтённых расходов ведет к прямым финансовым убыткам эксплуатирующих организаций, необоснованному росту тарифов для населения, перерасходу электроэнергии на перекачку и очистку воды, а также к негативному воздействию на окружающую среду.

К основным факторам, способствующим образованию неучтенных расходов, относятся.

1. Технические причины

1.1 Физический износ трубопроводов и оборудования. Большинство коммунальных сетей в России были построены в середине XX века и уже давно исчерпали свой ресурс. Коррозия металлических труб, трещины в бетонных конструкциях и деформации пластиковых трубопроводов приводят к значительным утечкам. Использование некачественных материалов при строительстве или ремонте сетей увеличивает вероятность повреждений.

1.2 Гидравлические удары и аварийные ситуации. Резкие перепады давления в системе могут вызывать разрывы трубопроводов и соединений.

1.3 Неисправности приборов учета. Механические счетчики воды имеют ограниченный срок службы (обычно 8-12 лет). После этого они начинают работать с погрешностью или полностью выходят из строя. Накипь, ржавчина и другие примеси в воде могут блокировать

движущиеся части счетчиков, что приводит к занижению показаний. Некоторые потребители используют магниты для замедления работы счетчиков, что искусственно снижает их показания.

1.4 Утечки в местах соединений и фитингов. Некачественная сборка трубопроводов или износ уплотнителей приводит к постоянным мелким утечкам. Подземные утечки (вода, просачивающаяся через микротрещины или крупные повреждения труб, часто остается незамеченной). Разрывы трубопроводов на поверхности или в подвалах зданий также могут оставаться без своевременного устранения.

2. Организационные причины

2.1 Незаконные подключения. Некоторые потребители подключаются к системе водоснабжения самовольно, минуя приборы учета. Установка обводных труб или механическое вмешательство в работу счетчиков позволяет потребителям использовать воду бесплатно. Некоторые абоненты намеренно искажают показания счетчиков для снижения оплаты.

2.2 Недостаточный уровень контроля. Отсутствие регулярного мониторинга. Пассивный подход к контролю состояния сетей приводит к тому, что утечки и неисправности обнаруживаются слишком поздно. Низкая квалификация персонала. Сотрудники, ответственные за обслуживание сетей, иногда не обладают достаточной квалификацией для выявления и устранения проблем. Отсутствие жестких санкций за хищение воды снижает мотивацию потребителей соблюдать правила.

2.3 Проблемы с документацией. Устаревшие схемы сетей. Часто актуальные схемы расположения трубопроводов отсутствуют или не соответствуют реальному положению дел. Несоответствие между фактическими и документально зафиксированными данными приводит к искажению статистики потерь.

3 Технологические причины

3.1 Неэффективные методы диагностики. Использование устаревших методов поиска утечек (например, визуальный осмотр) не позволяет оперативно выявлять проблемы. Отсутствие систем телеметрии и дистанционного мониторинга затрудняет контроль за состоянием сетей.

3.2 Нерациональное использование воды. Перерасход воды при техническом обслуживании. Во время ремонтных работ или испытаний сети часто происходит избыточный сброс воды. Регулярная промывка сетей для удаления загрязнений также приводит к дополнительным потерям.

4 Социально-экономические причины

4.1 Низкая платежная дисциплина. Неполная оплата услуг. Некоторые потребители игнорируют счета за воду, что создает дополнительную финансовую нагрузку на предприятия ЖКХ.

4.2 Экономическая неэффективность. Недостаток инвестиций. Отсутствие средств на модернизацию сетей и оборудования увеличивает вероятность аварий и утечек. Потери воды увеличивают затраты на ее подачу и очистку, что приводит к росту тарифов для законопослушных потребителей.

Инфраструктура водоотведения является скрытым элементом городского хозяйства, однако ее состояние напрямую определяет экологическую безопасность территории. Если в системах водоснабжения термин неучтенные расходы однозначно трактуется как утечка товарной воды, то в водоотводящих сетях ситуация сложнее. В системах водоотведения проблема имеет обратный характер. Здесь неучтенными расходами часто называют неорганизованный приток ли отток сточных вод.

Основные источники:

1. Инфильтрация грунтовых вод. Через негерметичные стыки труб, колодцев и коллекторов чистая грунтовая вода попадает внутрь канализации. Это увеличивает объем стоков, перегружает очистные сооружения и насосные станции, повышая затраты на электроэнергию и реагенты.

2. Неучтенные сбросы. Подключение ливневой канализации к хозяйственно-бытовой сети (что запрещено нормами), сбросы от незарегистрированных предприятий.

3. Переливы. Аварийные сбросы неочищенных стоков в водоемы из-за переполнения коллекторов.

По данным официальных отчетов, в ДНР реализуется долгосрочная программа модернизации ЖКХ до 2030 года, в рамках которой запланированы следующие объемы работ в сфере водоотведения:

- капитальный ремонт 77,5 км магистральных водоводов и канализационных сетей;
- реконструкция канализационных насосных станций (КНС) и очистных сооружений в Донецке, Макеевке, Горловке и Мариуполе;
- замена изношенных участков труб позволила сократить потери воды в 2,5 раза по сравнению с базовыми показателями прошлых лет.

Неучтенные расходы системы коммунального водоснабжения и водоотведения оказывают негативное влияние на окружающую среду: загрязнение почвы и грунтовых вод, подтопление территорий, образование провалов и деформаций труб, нарушение экосистем.

Проблема неучтенных расходов в системах коммунального водоснабжения и водоотведения требует комплексного подхода к решению. Эффективное управление водными ресурсами возможно только при сочетании современных технологий, грамотной организации работы и строгого контроля за состоянием инженерных сетей.

Для успешного решения проблемы рекомендуется:

- разработать долгосрочную программу модернизации;
- внедрить систему мониторинга неучтенных расходов и потерь;
- проводить регулярный аудит сетей;
- обучать персонал новым технологиям;
- привлекать инвестиции в обновление инфраструктуры.

Практическая значимость исследования заключается в разработке конкретных рекомендаций по снижению уровня потерь, которые могут быть использованы как руководством коммунальных предприятий, так и органами государственного управления для совершенствования нормативно-правовой базы и разработки программ модернизации систем водоснабжения. Предложенные меры охватывают как технические аспекты (реконструкция сетей, внедрение современного оборудования), так и организационные вопросы (совершенствование системы учета, повышение квалификации персонала).

Выводы. Неучтенные расходы в системах водоснабжения и водоотведения являются сложной многофакторной проблемой, которая требует комплексного подхода к решению. Для эффективного управления этими потерями необходимо сочетать модернизацию инфраструктуры, внедрение современных технологий диагностики и мониторинга, а также совершенствование организационных и правовых механизмов контроля. Только так можно добиться значительного снижения уровня потерь и обеспечить устойчивое функционирование систем коммунального водоснабжения.

Список литературы

1. СП 31.13330.2021. Свод правил. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения : актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84* : издание официальное : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от

27 декабря 2021 г. № 1016/пр : дата введения 2022-01-28 / разработан ФГБУ НИИСФ РААСН. – Москва : Стандартинформ, 2025. – 159 с. – Текст : непосредственный.

2. Программа комплексного развития систем коммунальной инфраструктуры ДНР до 2030 года [Электронный ресурс] // Минстрой ДНР. – URL: <https://minstroy-dpr.gosuslugi.ru/> (дата обращения: 15.02.2026). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.

3. Терентьев, В. И. Инженерные системы безопасного водоснабжения и водоотведения городов и населённых мест / В. И. Терентьев. — Санкт-Петербург : Гуманистика, 2024. — 220 с. — ISBN 5-86050-194-3. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/139126.html> (дата обращения: 26.12.2025). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

4. Контроль потерь в сетях водоснабжения: методики определения неучтенных расходов воды [Электронный ресурс] // Элдис. – 2024. – URL: <https://eldis24.ru/news/articles/kontrol-poter-v-setyakh-vodosnabzheniya-metodiki-opredeleniya-neuchtennykh-raskhodov-vody/> (дата обращения: 15.02.2026). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.

5. Зайченко Л. Г., Марченко В. А., Головки В. А. Повышение эффективности работы централизованной системы водоснабжения города в структуре ГУП ДНР «ВОДА ДОНБАССА». Электронный сборник статей по материалам VIII открытой международной очно-заочной научно-практической конференции молодых ученых и студентов (15 марта 2024 г., г. Макеевка). – Макеевка. – 2024. – С. 193-195.

6. Попов, О. Н. Системы водоснабжения и водоотведения. В 2 частях. Ч.1 : учебное пособие / О. Н. Попов, А. Н. Грибков. — Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2023. — 128 с. — ISBN 978-5-8265-2589-0, 978-5-8265-2590-6 (ч.1). — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/141086.html> (дата обращения: 24.12.2025). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.

УДК 628.33:691

Зайченко Людмила Геннадьевна,
к.т.н., доцент каф. ВВ и ОВР;
Акулова Юлия Геннадьевна,
ст. преп. каф. ВВ и ОВР;
Половнева Марина Александровна,
ст. преп. каф. ВВ и ОВР,
ЦКПИВЛ, ГУП ДНР «ВОДА ДОНБАССА»,
ДОННАСА - филиал НИУ МГСУ

УТИЛИЗАЦИЯ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД КАНАЛИЗАЦИОННЫХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Представлена характеристика осадков сточных вод, образующихся в процессе механической и биологической очистки воды. Показано, что актуальным направлением обращения с осадками сточных вод является разработка и внедрение экологически безопасной и экономически выгодной технологии их утилизации. Исходя из рассмотренных преимуществ и недостатков различных технологий и области применения осадков сточных вод сделан вывод о целесообразности их применения в строительной индустрии, в частности, при производстве строительных материалов, что позволяет не только решить проблему утилизации отходов, но и создать новые виды строительных материалов с улучшенными характеристиками.

Ключевые слова: осадки сточных вод, утилизация отходов, строительные материалы, сельскохозяйственное использование, экологическая безопасность.

Введение. В условиях стремительной урбанизации и роста населения нагрузка на системы водоотведения возрастает с каждым годом. Канализационные очистные сооружения (КОС) играют ключевую роль в защите окружающей среды, очищая сточные воды перед их сбросом в водоемы. Однако у этого процесса есть обратная сторона – образование осадков сточных вод (ОСВ). Ежегодно в мире образуются миллионы тонн влажного осадка. Долгое время основным способом обращения с ним было захоронение на полигонах, но этот путь ведет к загрязнению почв, грунтовых вод и выбросам парниковых газов. Сегодня утилизация осадков сточных вод – это не просто вопрос санитарии, но и важная часть концепции циркулярной экономики, где отходы превращаются во вторичные ресурсы.

Основной материал. При эксплуатации канализационных очистных сооружений образуются большие объёмы осадков сточных вод (сырой осадок и отработанный активный ил). Осадок сточных вод – это концентрированная масса, образующаяся в процессе механической и биологической очистки воды. Его состав неоднороден и зависит от источника стоков (бытовые, промышленные, ливневые).

Основные компоненты осадков сточных вод (ОСВ):

- органическое вещество: 50-70% (потенциальный источник энергии);
- биогенные элементы: азот, фосфор, калий (ценные удобрения);
- вода: до 95-98% в сыром виде (требует обезвоживания);
- загрязнители: тяжелые металлы, патогенные микроорганизмы, стойкие органические загрязнители. Именно наличие загрязнителей делает прямое использование ОСВ опасным, требуя обязательной предварительной обработки.

Осадки сточных вод представляют собой крупные загрязнения, задерживаемые решётками, осадок из песколовков, сырой осадок, выпадающий в первичных отстойниках, и отработанный активный ил или биоплёнку, образующиеся в сооружениях биохимической

очистки (БХО). Твёрдая фракция сырого осадка состоит из органических и минеральных веществ, а отработанный активный ил представлен комплексом микроорганизмов, участвующих в процессе БХО, которые ежегодно накапливаются в местах удаления отходов, занимают огромные территории плодородных земель и представляют экологическую опасность ввиду загрязнения почвы, атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод. Несмотря на то, что осадки сточных вод относят к малоопасным отходам (IV класс), последствия их хранения на иловых площадках создают экологические, экономические и социальные проблемы. В связи с этим актуальной является разработка и внедрение экологически безопасной и экономически выгодной технологии утилизации осадков сточных вод. Утилизация ОСВ позволит не только уменьшить их объёмы, но и, в первую очередь, решить экологические проблемы, сопровождающие хранение данного вида отходов.

Современные технологии утилизации осадков сточных вод делятся на основные гр.: сельскохозяйственное и строительное использование, термическая переработка и захоронение (как наименее предпочтительный вариант) (таблица 1).

Наиболее рациональным вариантом утилизации обработанных осадков является их использование в качестве органоминеральных удобрений, поскольку в своём составе они содержат биогенные элементы: азот, фосфор и калий.

С точки зрения растениеводства, осадки сточных вод представляют собой ценное органическое удобрение. После надлежащей обработки они содержат комплекс питательных веществ, необходимых для роста растений:

- азот (N): содержится в органической форме, что обеспечивает пролонгированное действие и снижает риск вымывания в грунтовые воды по сравнению с минеральными удобрениями;
- фосфор (P): критически важный элемент, запасы которого в природе конечны. ОСВ могут служить вторичным источником фосфора;
- калий (K) и микроэлементы: медь, цинк, железо и другие элементы в доступных для растений формах;
- органическое вещество: улучшает структуру почвы, повышает ее влагоемкость, аэрацию и стимулирует развитие полезной почвенной микрофлоры.

Однако препятствием утилизации может являться присутствие в осадках вредных примесей, в том числе ионов тяжёлых металлов. Одним из направлений подготовки осадков к утилизации является удаление из осадков таких примесей.

Существующие способы удаления ионов тяжёлых металлов можно подразделить на реагентные, физико-химические и реагентно-биологические. Реагентные способы основаны на обработке влажных осадков растворами кислот, при этом в результате химических реакций с ионами тяжёлых металлов образуются растворимые соли, удаляемые при обезвоживании. Физико-химические способы включают экстракцию соединений тяжёлых металлов органическими кислотами, обработку осадка кальцийсодержащими материалами. Реагентно-биологический способ основан на сочетании биологических процессов и реагентной обработки осадка. Анализ способов показывает, что все они обладают различного рода недостатками, которые затрудняют их применение. К таким недостаткам можно отнести сложность технологических схем, большие расходы реагентов.

В зависимости от качества осадка сточных вод области применения в сельском и лесном хозяйстве, выделяют несколько направлений его использования.

1. Рекультивация нарушенных земель: наиболее безопасный и перспективный путь. ОСВ используются для восстановления плодородного слоя на землях после добычи полезных ископаемых, на свалках, эродированных склонах. Здесь риск попадания загрязнителей в пищевую цепочку минимален.

2. Лесное хозяйство: внесение осадков в лесные питомники и плантации древесных пород. Деревья эффективно поглощают питательные вещества, а риск потребления человеком продукции отсутствует.

Таблица 1 – Технологии утилизации осадков сточных вод

Технологии		Преимущество	Недостатки
1		2	3
Сельскохозяйственное использование			
Компостирование	Осадок смешивают с опилками, соломой или торфом и подвергают аэробному сбраживанию. В процессе температура поднимается до 60-70°C, что уничтожает патогены и семена сорняков. На выходе получается безопасный органо-минеральный грунт	Восстановление плодородия почв, низкая стоимость	Риск накопления тяжелых металлов в почве, сезонность внесения, необходимость строгого лабораторного контроля, негативное общественное восприятие
Внесение в почву	Обеззараженный и обезвоженный осадок используется как удобрение		
Термическая переработка. Сжигание и высокотемпературная обработка позволяют радикально уменьшить объем отходов (до 90%) и обезвредить их			
Сжигание	Осадок сжигается в специальных печах. Выделяющееся тепло используется для генерации электроэнергии или отопления (когенерация)	Полное уничтожение патогенов и органических загрязнителей, минимальный объем золы, получение энергии	Высокие капитальные затраты, риск выбросов диоксинов и фуранов (требует дорогих систем газоочистки), образование золы, требующей утилизации
Пиролиз и газификация	Нагрев без доступа кислорода. Позволяет получить синтез-газ, жидкое топливо и твердый углеродистый остаток (биоуголь)		
Анаэробное сбраживание. Технология, при которой осадок перерабатывается в герметичных резервуарах (метантенках) без доступа кислорода			
Метановое брожение	Позволяет получить биогаз (смесь метана и CO ₂) и сброженный осадок	Энергетическая эффективность, снижение запаха, стабилизация осадка	Требует сложного инженерного оборудования
Использование в строительстве			
Золошлаковые остатки после сжигания или специально обработанный осадок могут применяться при производстве строительных материалов	Добавка при производстве цемента, изготовление керамического кирпича, тротуарной плитки, дорожных покрытий	Иммобилизация тяжелых металлов в матрице материала, замещение природных ресурсов (глина, песок)	Ограниченный рынок сбыта, необходимость сертификации материалов
Полигонное захоронение			
Размещение на полигонах	Метод, при котором обезвоженный осадок вывозится на специальные карты полигонов ТБО	Экологические риски	Рост тарифов на размещение, что стимулирует переработку

3. Озеленение городов: использование компостированных осадков для создания газонов, цветников и посадки деревьев вдоль автомагистралей (где выращивание пищевых культур запрещено).

4. Сельское хозяйство (ограниченно): внесение под технические культуры или зерновые при соблюдении всех норм безопасности и лабораторного контроля.

Применение осадков сточных вод в строительной индустрии представляет собой одно из наиболее перспективных направлений рециклинга, позволяющее не только решить проблему утилизации отходов, но и создать новые виды строительных материалов с улучшенными характеристиками. В отличие от сельскохозяйственного использования, строительная переработка ОСВ обеспечивает надежную иммобилизацию потенциально опасных компонентов (тяжелые металлы, патогены) в матрице материала, минимизируя экологические риски.

Осадки сточных вод после термической обработки обладают свойствами, ценными для производства строительных материалов:

- диоксид кремния (SiO_2): формирует каркас керамических материалов, повышает прочность;
- оксид алюминия (Al_2O_3): улучшает термостойкость и механические свойства;
- оксид железа (Fe_2O_3): придает цвет керамике, выступает как минерализатор при обжиге;
- оксид кальция (CaO): участвует в процессах гидратации в цементных системах;
- органическое вещество: выгорает при обжиге, создавая пористость (эффект «выгорающих добавок»).

После сжигания при температурах 800-1200°C органические загрязнители и патогены полностью уничтожаются, а тяжелые металлы фиксируются в кристаллической решетке полученных материалов, что делает их экологически безопасными при эксплуатации.

Основные направления применения в строительстве

1. Производство керамического кирпича и черепицы.

Технологический процесс: обезвоженный осадок смешивается с глиной в пропорции от 5 до 30% по массе. Формуется кирпич-сырец. Обжиг при 900-1050°C: органика выгорает, создавая микропоры, минеральная часть спекается с глиной.

Преимущества: выгорание органики снижает расход топлива на обжиг на 15-25%.

Пористая структура снижает коэффициент теплопроводности кирпича на 10-20%.

Готовые изделия легче традиционных на 8-12%.

Ограничения: при содержании ОСВ более 30% может снижаться марка по прочности кирпича. Требуется контроль выбросов при обжиге (возможное образование диоксинов при недостаточной температуре).

2. Производство цемента и бетонных смесей. ОСВ могут использоваться в цементной промышленности двумя способами:

а) в качестве альтернативного топлива. Высушенный осадок (теплотворная способность 10-15 МДж/кг) подается в печь цементного клинкера. Органика сгорает, минеральная часть входит в состав клинкера. Результат: замещение угля/газа, снижение себестоимости цемента.

б) в качестве минеральной добавки. Зола от сжигания ОСВ (после контроля на тяжелые металлы) может заменять до 5-10% портландцемента в бетонах неответственных конструкций. Исследуется возможность использования в производстве пенобетона и газобетона.

3. Дорожное строительство.

Обработанные ОСВ находят применение при устройстве дорожных оснований и насыпей.

Стабилизация грунтов: зола ОСВ, богатая кальцием, может использоваться для укрепления слабых грунтов (аналогично известу или цементу).

4. Производство керамзита и аглопорита: вспучивание глинисто-осадочных смесей при 1100-1200°C дает легкий пористый заполнитель для бетонов.

5. Асфальтобетонные смеси: исследуется добавление мелкодисперсной золы ОСВ в минеральный порошок.

Преимущества для дорожной отрасли: Снижение стоимости дорожных работ за счет использования местного вторичного сырья. Улучшение дренажных свойств дорожных оснований благодаря пористости материалов.

6. Рекультивация и ландшафтные работы.

Искусственные грунты: компостированные ОСВ смешиваются с песком, торфом и минеральными добавками для создания плодородного слоя при озеленении промышленных зон, отвалов, полигонов.

7. Шумозащитные экраны и откосы: использование гранулированных ОСВ для укрепления склонов вдоль автодорог.

Строительная отрасль обладает значительным потенциалом для поглощения вторичных минеральных ресурсов, и осадки сточных вод могут стать важным элементом устойчивого развития индустрии в ближайшие десятилетия.

Вывод. В условиях роста объемов урбанизированных отходов и исчерпания природных ресурсов проблема утилизации осадков сточных вод (ОСВ) канализационных очистных сооружений приобретает критическое значение. Традиционные методы захоронения ОСВ на полигонах ведут к загрязнению почв и грунтовых вод, а также занимают значительные земельные площади. Внедрение принципов циркулярной экономики требует перехода к технологиям рециклинга отходов в материальные потоки, в частности, в строительную сельскохозяйственную индустрию.

Список литературы

1. СП 32.13330.2018. Свод правил. Канализация. Наружные сети и сооружения : актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85 : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 25 декабря 2018 г. № 860/пр : дата введения 2019 06 26 / разработан ФГБУ НИИСФ РААСН. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 70 с. – Текст : непосредственный.

2. Федеральный закон от 24.06.1998 N 89-ФЗ (ред. от 02.07.2021) "Об отходах производства и потребления" (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2022) — Основа правового регулирования обращения с ОСВ.

3. Федеральный классификационный каталог отходов. Приказ Росприроднадзора от 22.05.2017 № 242 (ред. от 20.12.2024) "Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов"— определение класса опасности золы от сжигания ОСВ

4. Павлинова И. И. Совершенствование методов биотехнологии в строительстве и эксплуатации систем водоснабжения и водоотведения : монография / Павлинова И. И., Алексеев Л. С., Неверова М. А. — Москва : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2014. — 148 с. — ISBN 978-5-7264-0802-6. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/23741.html> (дата обращения: 24.01.2026). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.

5. Журавлева И. В. Эксплуатация систем водоснабжения и водоотведения : учебное пособие / Журавлева И. В. — Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2021. — 136 с. — ISBN 978-5-4497-1133-5. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/108364.html> (дата обращения: 24.01.2026). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.

УДК 628.31

Левыкин Ринат Романович,
магистрант гр. ВВм-52а;
Спедчук Иван Викторович,
магистрант гр. ОЗВВм-55а;
Григоренко Надежда Ивановна,
К.т.н., доцент каф. ВВ и ОВР,
ДОННАСА-филиал НИУ МГСУ

РАЗРАБОТКА МЕТОДИК КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПОСТУПАЮЩИХ СТОЧНЫХ ВОД

Данная статья посвящена разработке и обоснованию методики комплексной оценки качества сточных вод, поступающих на очистные сооружения. Целью работы является создание универсального алгоритма для интегральной оценки состава стоков, который позволяет преодолеть фрагментарность существующих методов контроля и учесть совокупное влияние различных загрязнителей. В ходе исследования проведён анализ существующих подходов к оценке качества воды, включая индексный метод, многокритериальный анализ и метод главных компонент. На основе этого анализа предложен алгоритм расчёта интегрального индекса качества воды (ИИКВ), включающий этапы выбора приоритетных показателей, их нормализации, присвоения весовых коэффициентов на основе класса опасности и агрегации в единый показатель с использованием аддитивной и мультипликативной моделей. Практическая апробация методики проведена на примере условных городских очистных сооружений. Разработан шаблон в Microsoft Excel для автоматизации расчётов.

Ключевые слова: качество сточных вод, комплексная оценка, интегральный индекс, очистные сооружения, мониторинг.

Контроль качества сточных вод на входе очистных сооружений становится особенно актуальным в условиях растущей антропогенной нагрузки на водные ресурсы и ужесточения экологических норм. Существующие методы оценки часто фрагментарны и не дают полного представления о составе и свойствах стоков, что затрудняет эффективное управление очисткой [2].

Современные очистные системы сталкиваются с изменчивым составом сточных вод и новыми загрязнителями (микропластик, фармацевтические препараты). Традиционные контрольные методы, основанные на ограниченном наборе показателей, не отражают реальную токсичность и влияние стоков на биологические процессы и окружающую среду.

Разработка комплексных методик оценки сточных вод необходима для оптимизации работы очистных сооружений, предотвращения аварий, прогнозирования эффективности очистки и защиты водных объектов-приемников [1, 2].

Таким образом, целью работы является изучение и внедрение методик комплексной оценки качества поступающих сточных вод, направленных на повышение точности и эффективности мониторинга загрязнений, а также улучшение управления водными ресурсами.

Комплексная оценка качества сточных вод требует анализа десятков разнородных показателей (физических, химических, биологических), измеряемых в разных единицах и имеющих различную степень влияния на экосистему. Использование только отдельных показателей не позволяет получить целостную картину и затрудняет принятие управленческих

решений [3, 4]. Для решения этой проблемы применяются методы агрегирования данных, которые позволяют свести множество параметров к одному или нескольким обобщенным индикаторам.

1. *Индексный метод (ИЗВ)*. Подходит для регулярной отчетности природоохранным органам: например, инженер-технолог может агрегировать данные по 10-15 показателям (БПК, ХПК, азот и др.) в единый индекс. Сравнение ИЗВ за периоды позволяет быстро оценить динамику эффективности очистных сооружений без анализа громоздких таблиц [5].

2. *Многокритериальный анализ (МКА)*. Эффективен при выборе вариантов модернизации очистных систем. Например, с помощью данного метода экспертная группа может присваивать веса критериям (эффективность очистки, капитальные и эксплуатационные расходы, надежность) и формировать рейтинг вариантов, выявляя оптимальное решение по балансу затрат и результатов [6].

3. *Метод главных компонент (Principal component analysis – PCA)*. Это статистический метод снижения размерности данных. Его цель – преобразовать набор исходных, возможно, коррелирующих между собой переменных в новый набор некоррелирующих переменных, называемых главными компонентами. Помогает выявить скрытые закономерности в массивах данных [7].

4. *Нечеткая логика*. Это подход, который позволяет работать с неточными, расплывчатыми понятиями, имитируя человеческое мышление. Вместо бинарной логики "да/нет" (например, "вода загрязнена / не загрязнена"), он использует степени принадлежности к тому или иному классу (например, "вода на 70% принадлежит к классу «сильно загрязненная»"). Оптимизирует автоматизированное управление процессами очистки [8].

Научная новизна использования исследуемых методов заключается не столько в самих методах (многие из них известны десятилетиями [5-8]), сколько в их применении для решения сложных, многофакторных экологических задач, где традиционные подходы неэффективны.

Для разработки методики комплексной оценки качества сточных вод необходимо обосновать выбор показателей, их значимость и методику определения весовых коэффициентов. Критериями выбора показателей являются:

- научное обоснование (данные национальных и международных стандартов);
- релевантность для целевой задачи (например, биологическая безопасность, токсичность, пригодность для сброса/рециркуляции);
- возможность измерения методологически и технически;
- совместимость с методами анализа (химические, микробиологические, физические).

Расчёт весовых коэффициентов – это процесс определения относительной значимости или важности конкретного фактора или параметра по сравнению с другими. Весовые коэффициенты помогают взвесить влияние каждого элемента на итоговый результат в разных областях.

Для расчёта весовых коэффициентов используют, например [9]:

- метод экспертных оценок – опрос экспертов, которые ранжируют показатели по степени их важности;
- метод попарного сравнения – каждый фактор сравнивается с другим, степень влияния оценивается по специальной вербально-числовой шкале;
- метод непосредственной оценки – каждый эксперт присваивает показателю определённый балл по определённой шкале, затем по каждому показателю баллы суммируются и определяется средний балл.

Как уже говорилось ранее, интегральный индекс качества воды (ИИКВ) – это числовой показатель, который объединяет информацию о множестве отдельных загрязняющих веществ в единую оценку. Это позволяет упростить сложный набор данных, облегчить сравнение

качества воды в разных точках или в разное время и служить основой для принятия управленческих решений.

Единого, законодательно утвержденного на международном уровне алгоритма, не существует, однако есть несколько общепринятых методик. Алгоритм можно разбить на 5 основных шагов:

Шаг 1: Выбор приоритетных показателей.

Невозможно и нецелесообразно учитывать абсолютно все вещества. Выбирается ограниченный список ключевых загрязнителей, характерных для данного типа сточных вод (промышленные, хозяйственно-бытовые, ливневые). Типичные показатели: взвешенные вещества, рН, БПК₅, ХПК, азот аммонийный, нитриты, нитраты, фосфаты, нефтепродукты, СПАВ (синтетические поверхностно-активные вещества), фенолы, тяжелые металлы (медь, цинк, никель, кадмий, свинец и др.).

Шаг 2: Нормализация показателей.

Поскольку показатели измеряются в разных единицах (мг/л, ед. рН и т.д.), их необходимо привести к единой безразмерной шкале. Чаще всего это делается путем сравнения фактической концентрации C_i каждого вещества с его нормативом – предельно допустимой концентрацией (ПДК) для сброса в водные объекты соответствующей категории.

Шаг 3: Введение весовых коэффициентов.

Разные вещества обладают разной степенью опасности. Чтобы это учесть, каждому показателю присваивается весовой коэффициент w_i , часто на основе его класса опасности.

Примерная шкала весовых коэффициентов в зависимости от класса опасности вещества:

- 1 класс (чрезвычайно опасные): $w=4$ (например, ртуть, кадмий);
- 2 класс (высокоопасные): $w=3$ (например, свинец, медь, фенолы);
- 3 класс (опасные): $w=2$ (например, нитриты, нефтепродукты);
- 4 класс (умеренно опасные): $w=1$ (например, фосфаты, сульфаты).

Эти значения являются примерными и могут быть скорректированы в рамках конкретной методики.

Шаг 4: Агрегация (расчет итогового индекса).

После нормализации всех показателей и назначения им весовых коэффициентов w_i необходимо объединить их в единый интегральный индекс – значение, характеризующее комплексное качество сточных вод.

Используются два основных подхода к агрегированию (комплексированию) – аддитивный и мультипликативный комплексы. Нормализованные и взвешенные значения объединяются в единый интегральный индекс. Наиболее распространенной является формула средневзвешенного арифметического (аддитивного).

Иногда вместо среднего арифметического используется среднее геометрическое (мультипликативный), которое сильнее реагирует на экстремальные превышения даже по одному показателю.

Шаг 5: Интерпретация результата.

Сам по себе индекс – это просто число. Для принятия решений его необходимо классифицировать. Примерная шкала оценки приведена в таблице 1.

Таблица 1 - Примерная шкала оценки качества воды

Значение ИИКВ	Качество воды	Характеристика
1	2	3
≤ 1.0	Условно чистая	Превышений ПДК нет или они незначительны.
$1.0 < \text{ИИКВ} \leq 2.5$	Слабо загрязненная	Наблюдаются незначительные превышения ПДК.
$2.5 < \text{ИИКВ} \leq 5.0$	Загрязненная	Уровень загрязнения существенный.
$5.0 < \text{ИИКВ} \leq 10.0$	Грязная	Высокий уровень загрязнения.
> 10.0	Очень грязная	Экстремально высокий уровень загрязнения.

Самым простым способом автоматизации и программной реализации рассмотренного алгоритма является использование электронных таблиц Microsoft Excel, которые являются идеальным инструментом для быстрой реализации этого алгоритма без программирования.

Объектом исследования, для которого предлагается использовать рассмотренную методику, являются городские сточные воды населенного пункта в умеренной климатической зоне юга Центральной России. Город с населением около 320 тыс. человек имеет преимущественно жилую застройку с частично развитой промышленностью (пищевая, легкая, машиностроительная). Сточные воды поступают на городские канализационные очистные сооружения (КОС) с механической, биологической и частичной химической очисткой перед сбросом в реку.

Сточные воды представляют смесь бытовых и промышленных стоков. Наблюдения за сентябрь-октябрь 2025 г. показали периодическое повышение концентраций органических соединений и фосфорно-азотных соединений, что указывает на интенсивную антропогенную нагрузку. Средние показатели концентраций загрязняющих веществ приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Средние показатели концентраций загрязняющих веществ сточных вод исследуемого объекта

Показатель	Ед. изм.	Среднее значение	Диапазон концентраций
БПК ₅	мг/л	121,6	98 – 140
ХПК	мг/л	200	175 – 225
Взвешенные вещества	мг/л	89,6	78 – 102
Азот аммонийный (NH ₄ -N)	мг/л	9,6	8 – 11
Фосфаты (PO ₄ -P)	мг/л	1,36	1,0 – 1,8
pH	ед.	7,2	6,9 – 7,6
Свинец (Pb)	мкг/л	0,015	0,009 – 0,022
Кадмий (Cd)	мкг/л	0,005	0,003 – 0,007
Ртуть (Hg)	мкг/л	0,0006	0,0003 – 0,001
Колониеобразующие (КОЕ)	ед./л	664	540 – 800
ПЦР-патоген	ед.	0,10	0,05 – 0,15

Расчёт интегрального индекса позволит количественно определить степень загрязнения и оценить эффективность работы очистных сооружений в динамике.

Весовые коэффициенты (w_i) назначались согласно классу опасности веществ (таблица 3).

Таблица 3 - Классы опасности веществ в исследуемом объекте.

Показатель	ПДК, мг/л (мкг/л)	Класс опасности	Весовой коэффициент (w_i)
1	2	3	4
БПК ₅	3.0	4	1
ХПК	30.0	4	1
TSS	15.0	4	1
NH ₄ -N	0.5	3	2
PO ₄ -P	0.2	3	2
pH	6.5–8.5	–	1*
Pb	6.0 (мкг/л)	2	3
Cd	1.0 (мкг/л)	1	4
Hg	0.1 (мкг/л)	1	4
КОЕ	1000 ед./л	–	2**
ПЦР-патоген	0.01 ед.	–	3**
<i>Примечания:</i> Для pH вес назначен условно, так как отклонение от нормы рассчитывалось как $pH_{факт} - pH_{норма}$ (норма = 7.0). *Для микробиологических показателей веса назначены экспертно с учётом эпидемиологической опасности.			

На первом этапе для каждого показателя была рассчитана кратность превышения ПДК (K_i) – отношение фактической концентрации к нормативной. Значения меньше 1 принимались равными 1, что исключает «перевзвешивание» малых концентраций при наличии сильных загрязнителей. Все данные были унифицированы в безразмерном виде (исключение: для pH использовалось отклонение от нейтрального значения: $K_{pH} = |pH_{факт} - 7.0| + 1$).

Для микробиологических показателей (КОЕ, ПЦР-патоген) K_i рассчитывался как отношение к нормативу (например, $K_{КОЕ} = 650/1000 = 0,65$, но по методике принимался равным 1, так как не превышал норму).

В таблице 4 приведены нормализованные коэффициенты по всем исследуемым показателям.

Таблица 4 - Нормализация показателей качества сточных вод для исследуемых проб.

№	БПК ₅ BOD ₅ (мг/л)	ХПК COD (мг/л)	Взвеш. в-ва TSS (мг/л)	NH ₄ -N (мг/л)	PO ₄ -P (мг/л)	pH	Pb (мкг/л)	Cd (мкг/л)	Hg (мкг/л)	КОЕ /л	ПЦР- пато- ген
1	0,48	0,30	0,71	0,50	0,75	0,97	0,77	0,75	0,71	0,58	0,70
2	0,12	0,70	0,29	0,30	0,38	1,00	0,31	0,25	0,43	0,31	0,30
3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,94	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	0,60	0,50	0,58	0,60	0,63	0,99	0,54	0,50	0,57	0,73	0,60
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Также данные таблицы 4 для пробы №1 отображены графически в виде лепестковой диаграмм (рисунок 1).

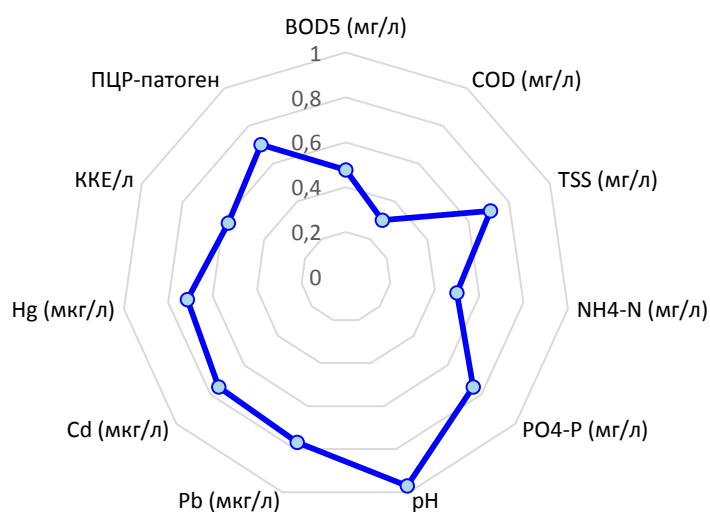


Рисунок 1 – Нормализованные параметры для пробы №1

Для комплексной оценки качества исследуемых сточных вод были рассчитаны два варианта ИИКВ: аддитивный индекс (средневзвешенное арифметическое) и мультипликативный индекс (геометрическое среднее):

Результаты расчётов для всех проб представлены в таблице 5 и на рисунке 2.

Таблица 5 - Результаты расчета индексов качества воды.

№	BOD5 (мг/л)	COD (мг/л)	TSS (мг/л)	NH4-N (мг/л)	PO4-P (мг/л)	pH	Pb (мкг/л)	Cd (мкг/л)	Hg (мкг/л)	КОЕ/л	ПЦР-патоген	Аддитивный	Мультипликатив.	Класс
1	0,48	0,30	0,71	0,50	0,75	0,97	0,77	0,75	0,71	0,58	0,70	0,58	0,55	Хор.
2	0,12	0,70	0,29	0,30	0,38	1,00	0,31	0,25	0,43	0,31	0,30	0,37	0,31	Удов.
3	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,94	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	Отл.
4	0,60	0,50	0,58	0,60	0,63	0,99	0,54	0,50	0,57	0,73	0,60	0,59	0,58	Хор.
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	Неуд.

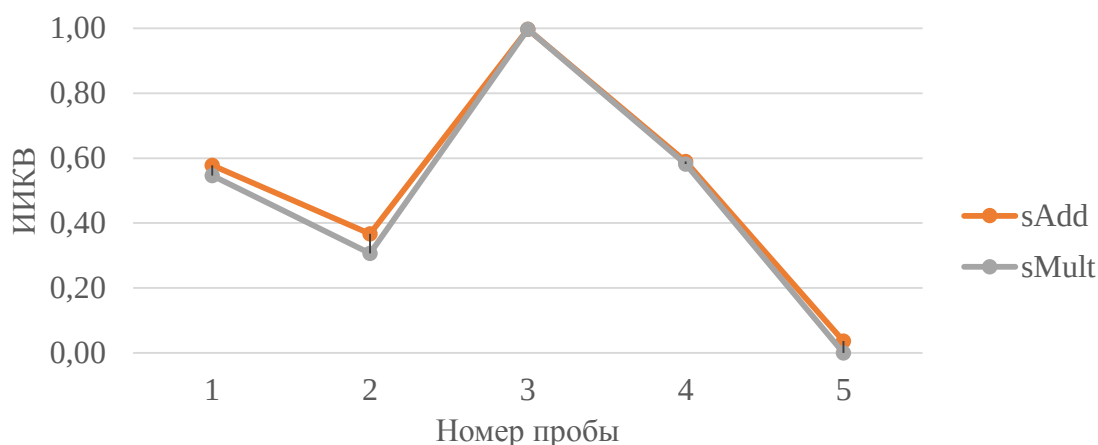


Рисунок 2 – Динамика аддитивного и мультипликативного индексов качества воды

Почти параллельное движение двух индексов означает, что динамика загрязнения не меняет своего характера от пробы к пробе, а также:

- отсутствие залповых выбросов –ни один токсикант существенно не превышает ПДК;
- преобладают взаимокоррелирующие фоновые загрязнители (БПК, ХПК, $\text{NH}_4\text{-N}$), из-за чего оба индекса растут одинаково;
- анализируется всего 5 стабильных проб, поэтому сезонные или аварийные пики не видны.

Предложенный алгоритм расчёта ИИКВ может быть автоматизирован в системе мониторинга КОС для оперативной оценки эффективности очистки с некоторой доработкой по количеству исследуемых проб.

Выводы:

1. Существующие методы оценки качества сточных вод носят фрагментарный характер. Анализ показал, что традиционные подходы, основанные на покомпонентном сравнении с ПДК, не дают целостной картины загрязнения, не учитывают синергетического эффекта и не позволяют оперативно управлять процессами очистки, особенно в условиях появления новых загрязнителей (микропластик, фармацевтические препараты).

2. Предложенная методика расчёта интегрального индекса качества воды (ИИКВ) систематизирует процесс оценки, объединяя 11 ключевых показателей (органические, биогенные, токсичные, микробиологические) в единый числовой показатель. Использование весовых коэффициентов, основанных на классах опасности, позволяет объективно отразить совокупную опасность стока.

3. Предложена апробация данной методики на практическом примере. Она позволяет отслеживать динамику качества воды, выявлять «узкие места» (наиболее влияющие загрязнители) и визуализировать результаты для принятия управленческих решений, что было продемонстрировано на графиках и лепестковой диаграмме.

Список литературы

1. Веницианов Е. В., Аджиенко Г. В. Современные проблемы управления качеством поверхностных вод // Труды ИБВВ РАН. 2019. №85 (88). с. 7-16. doi:10.24411/0320-3557-2019-

10001URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-problemy-upravleniya-kachestvom-poverhnostnyh-vod> (дата обращения: 01.02.2026).

2. Дровозова Т. И., Паненко Н. Н., Лещенко А. В. Интегральный показатель качества сточных вод, отводимых в водный объект // ИВД. 2019. №3 (54). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/integralnyy-pokazatel-kachestva-stochnyh-vod-otvodimyh-v-vodnyy-obekt> (дата обращения: 06.02.2026).с. 27-36.

3. Другов, Ю. С. Анализ загрязненной воды : практическое руководство / Ю. С. Другов, А. А. Родин. — 4-е изд. — Москва : Лаборатория знаний, 2024. — 679 с. — ISBN 978-5-93208-679-7. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/137737.html> (дата обращения: 31.03.2024). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

4. Технологии очистки сточных вод : учебное пособие / Д.С. Дворецкий [и др.].. — Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2018. — 81 с. — ISBN 978-5-8265-1948-6. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/94380.html> (дата обращения: 02.12.2025). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.

5. Memet Varol, Use of water quality index and multivariate statistical methods for the evaluation of water quality of a stream affected by multiple stressors: A case study. Environmental Pollution, Volume 266, Part 3, 2020, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115417>

6. Taraszkiewicz Natalia. Application of Multi-Criteria Analysis in the Selection of Individual Sewage Treatment Plants. Environmental Sciences Proceedings. 2021. – 9. 27. 10.3390/environsciproc2021009027.

7. Greenacre Michael. Principal component analysis. Nature Reviews Methods Primers. Greenacre Michael, Groenen Patrick, Hastie Trevor, Iodice D'Enza Alfonso, Markos Angelos, Tuzhilina, Elena. (2022). 2. 100. 10.1038/s43586-022-00184-w.

8. Информационный анализ и автоматизированное проектирование станций биохимической очистки : учебное пособие / Е. Н. Малыгин, Н. С. Попов, В. А. Немтинов [и др.]. — Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2012. — 121 с. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/64100.html> (дата обращения: 05.02.2025). — Режим доступа: для авторизир. пользователей

9. Григорьев А. В., Козин П. А., Остапчук А. В. Методика определения значений весовых коэффициентов // Имущественные отношения в РФ. 2004. №8. — с 73-83. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-opredeleniya-znacheniy-vesovyh-koeffitsientov> (дата обращения: 20.12.2025).

УДК 628.165

Синежук Инна Борисовна,
к.т.н., доцент каф. ВВ и ОВР,
Дубнянский Александр Васильевич,
магистрант гр. ОЗВВм-56а,
Косенко Владислав Валериевич,
Магистрант гр. ОЗВВм-56а,
ДОННАСА – филиал НИУ МГСУ

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЗОВСКОГО МОРЯ В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА ПИТЬЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Статья посвящена актуальному вопросу дефицита питьевой воды на территории Донецкой Народной Республики. Рассмотрена возможность использования воды Азовского моря в качестве источника водоснабжения. Проанализированы такие показатели качества воды Азовского моря как минерализация, средняя зимняя температура, ионный состав. Рассмотрены различные методы опреснения воды Азовского моря. На основании анализа предложен обратноосмотический метод опреснения.

Ключевые слова: поверхностные источники водоснабжения, Азовское море, минерализация, опреснение, электродиализ, обратный осмос.

Вода является жизненно важным природным ресурсом, без которого невозможно устойчивое экономическое, социальное и экологическое развитие. На данный момент на территории Донецкой Народной Республики остро стоит вопрос дефицита питьевой воды и соответственно источников питьевого водоснабжения.

Так, запасы пресной воды на территории ДНР находятся в виде поверхностных и подземных источников, качество и количество воды в которых не удовлетворяет существующим требованиям [1]. Поэтому предлагается рассмотреть возможность использования воды Азовского моря в качестве альтернативного источника водоснабжения для питьевых нужд ДНР.

Азовское море является внутренним морем бассейна Атлантического океана, с которым оно соединено узким и мелким Керченским проливом, Черным и Средиземным морями. Также данное море является одним из наиболее изученных морей Мирового океана, которое в силу своего геологического прошлого, физико-географических и климатических характеристик обладает рядом особенностей [2]:

- малые размеры (380 км в длину и 200 км в ширину);
- глубина 6,8-7,4 м;
- объем воды 290 км³;
- площадь поверхности 39000 км².

Основной обмен воды Азовского моря происходит через Керченский пролив с Черным морем. По среднесуточным данным, из Азовского моря поверхностным потоком ежегодно вытекает около 49 км³ воды, а нижним течением в него поступает около 34 км³ черноморской воды. Результирующий сток воды из Азовского моря в Черное примерно равен 15 км³/год [2].

Почти весь речной сток в море (более 90%) дают реки Дон и Кубань, а также около 20 небольших рек. Подавляющая часть стока приходится на весенне-летний сезон. Характеристики основных притоков Азовского моря приведены в таблице 1 [2].

Таблица 1 – Характеристики основных притоков Азовского моря

Река	Длина, км	Площадь водосбора, км ²	Площадь дельты, км ²	Средне-годовой расход, м ³ /сек
1	2	3	4	5
Дон	1870	422000	53,8	300-1220
Кубань	870	57900	4390	184-494
Миус	258	6680	8	5,28
Кальмиус	209	5070	не выражена	9,22

Также не менее важным критерием при рассмотрении возможности использования Азовского моря в качестве источника питьевого водоснабжения, является солевой баланс моря. Решающую роль в запасе солей в Азовском море играет двусторонний обмен через Керченский пролив, а «истинным регулятором» этого процесса является речной сток [3].

Средняя минерализация воды Азовского моря в наиболее неблагоприятный зимний период представлена на рисунке 1. Как видно из рисунка, пространственное распределение минерализации в условиях естественного притока речных вод однородно, наименьшее содержание солей наблюдается только в Таганрогском заливе, которое составляет 1-7 г/л. На акватории открытого моря солесодержание составляет в пределах 10–11 г/л. Изменение солесодержания по вертикали наблюдаются эпизодически и ярче всего выражены осенью и зимой [3].

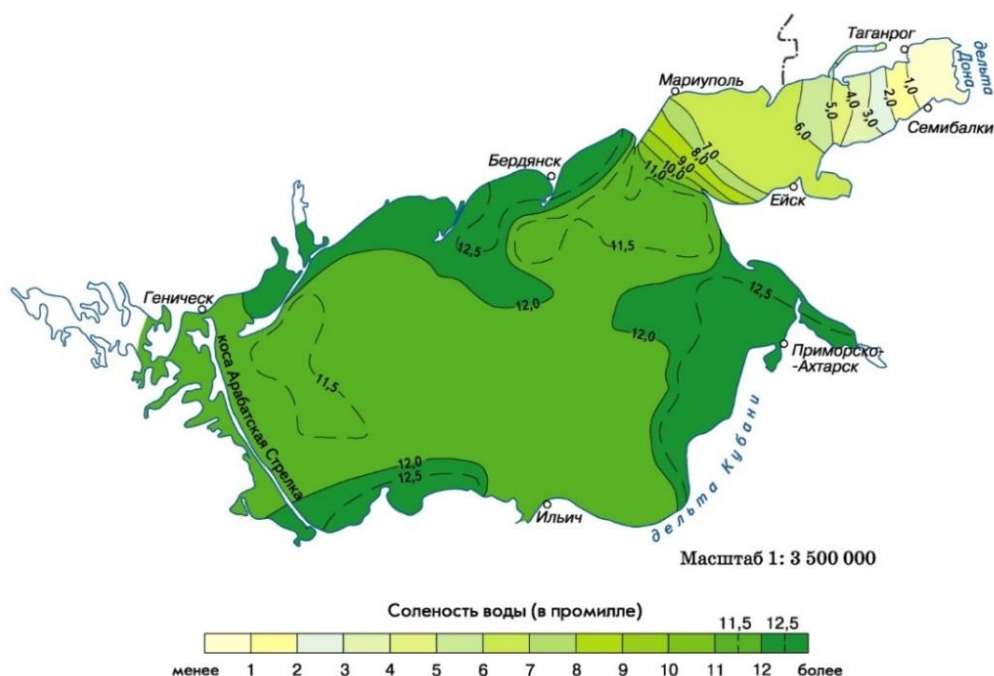


Рисунок 1 – Средние зимние показатели солесодержания Азовского моря

Весной и в начале лета вследствие таяния льдов и большого притока речных вод солесодержание понижается. Осенью и зимой оно почти одинаково от поверхности до дна

моря на большом протяжении. Наибольшая минерализация наблюдается в обособленном мелководном заливе Азовского моря Сиваше, наименьшая - в Таганрогском заливе [3].

Температурный режим Азовского моря характеризуется большой сезонной изменчивостью, свойственной неглубоким водоёмам, годовая амплитуда температуры воды составляет 27,5...28,5 °С. Средняя зимняя температура воды Азовского моря представлена на рисунке 2 [3].

Следующим важным показателем является химический состав Азовского моря, приведенный в таблице 2, изменение которого зависит от притока речных вод и водообмена с Чёрным морем.

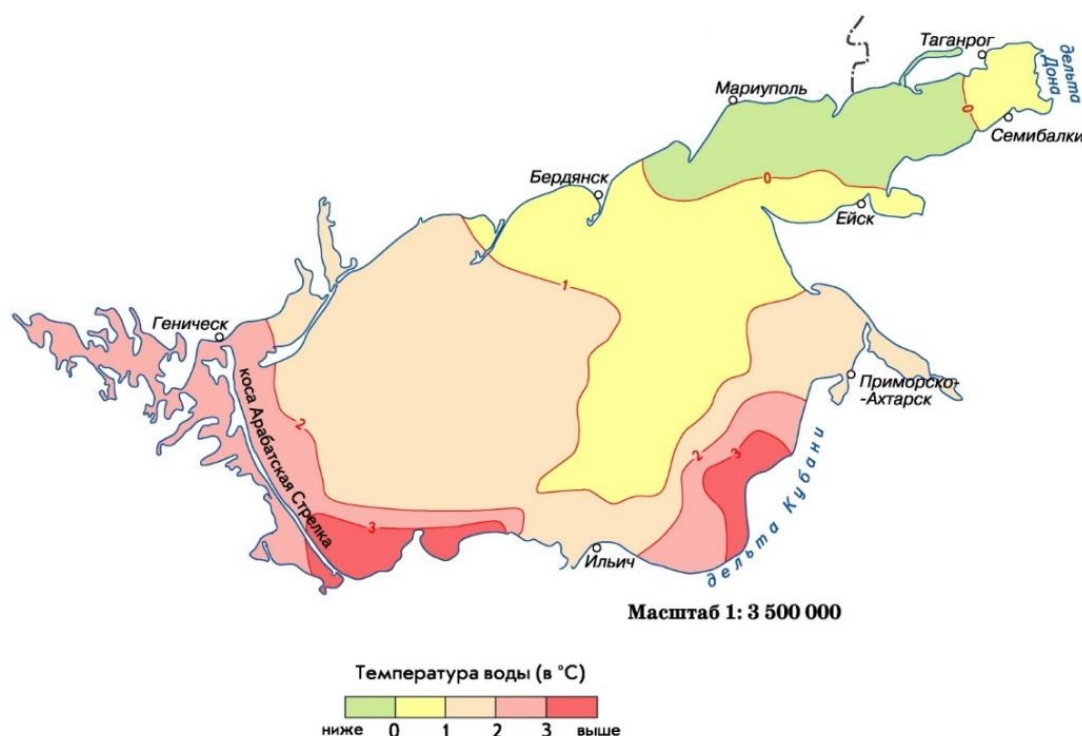


Рисунок 2 – Средняя зимняя температура воды Азовского моря

В среднем в поверхностных слоях открытой части моря содержится следующее ионы: натрий, калий, магний, кальций, хлор, бром, сульфаты, гидрокарбонаты [2].

Таблица 2 – Химический состав Азовского моря

Химическое вещество	Содержание в морской воде, г/л
1	2
Натрий (Na^+)	3,496
Калий (K^+)	0,132
Магний (Mg^{2+})	0,428
Кальций (Ca^{2+})	0,172
Хлориды (Cl^-)	6,538
Бромиды (Br^-)	0,021
Сульфаты (SO_4^{2-})	0,929
Гидрокарбонаты (HCO_3^-)	0,169

Кроме минеральных веществ, в воде Азовского моря содержится много биогенных элементов, приносимых в основном реками, водами Черного моря и атмосферными осадками. К этим элементам относятся фосфор, азот и кремний. По результатам исследований подсчитано, что реки и воды Черного моря, а так же атмосферные осадки приносят в Азовское море 17139 тонн фосфора, 75316 тонн азота и 119694 тонн кремния [2].

Проанализировав вышеприведенные показатели качества воды Азовского моря в акватории, примыкающей к ДНР, можно сказать, что вода этой акватории по степени минерализации относится к соленой (3-10 г/л), с большим содержанием хлоридов и большой годовой амплитудой температур.

Исходя из этого, при предварительном выборе метода подготовки воды, руководствуясь [4] для данного водного объекта, могут быть приняты такие методы опреснения воды, как электродиализ и обратный осмос.

Степень очистки воды электродиализом ограничивается технико-экономическими соображениями. По мере повышения концентрации ионов в рассольных камерах, усиливается осмотическое давление и тенденция к возврату через диафрагмы в диализные камеры. Повышение напряжения с целью ограничения этой тенденции удорожает эксплуатацию установки. Электродиализ рекомендуется применять при малой производительности и солесодержании исходной воды не свыше 10 г/л [5].

Обратный осмос является одним из наиболее перспективных методов обработки воды с солесодержанием до 40 г/л. Преимущества метода заключаются в небольших энергозатратах, простоте конструкций аппаратов, малых габаритов и простоте эксплуатации. Анализ развития технологий обессоливания и опреснения воды показывает, что в течение последних 10 лет наблюдается более интенсивное внедрение метода обратного осмоса и вытеснение им таких методов, как дистилляция воды и электродиализ.

Исходя из выше сказанного, можно сделать вывод о возможности использования воды Азовского моря как источника питьевого водоснабжения, а также можно предложить обратноосмотический метод опреснения, так как он имеет ряд преимуществ, которые заключены в малых энергозатратах, возможности применение для опреснения больших объемов воды в непрерывном режиме. Обычно установки опреснения морской воды полностью автоматизированы и не требуют вмешательства со стороны человека, а также имеют высокую степень очистки до 97-99% [5].

Список литературы

1. СанПиН 2.1.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : введены в действие Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 г. № 2 с 1 марта 2021 г. – Москва : Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека , 2021. – 988 с. - Текст : непосредственный.
2. Зубов, А. Р. Гидрологические особенности рек бассейнов Азовского и Черного морей : монография / А. Р. Зубов, Л. Г. Зубова. – Луганск : Издательство ФЛП Пальчак А. В., 2017. – 230 с. - Текст : непосредственный.
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 5. Азовское море / Государственный комитет СССР по гидрометеорологии ; Государственный

океанографический институт ; под ред. Н. П. Гоптарева [и др.]. – Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 1991. – 237 с. - Текст : непосредственный.

4. СП 31.13330.2021. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения = Water supply. Pipelines and portable water treatment plants : свод правил : актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84* «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения» : текст с изменениями и дополнениями : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 27 декабря 2021 г. № 1016/пр : пересмотр СП 31.13330.2012 «СНиП 2.04.02-84* Водоснабжение. Наружные сети и сооружения» : дата введения 2022-01-28 / разработан федеральным государственным бюджетным учреждением «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН). – Москва : Минстрой России, 2021. – IV, 115 с. ; 29 см. – Текст : непосредственный.

5. Слесаренко, В. Н. Опреснение морской воды / В. Н. Слесаренко. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 278 с. - Текст : непосредственный.

УДК 628.354:579.852.1:546.17

Ручка Владислав Владиславович,
ассист. каф. ВВ и ОВР;
Луцеева Татьяна Игоревна,
магистрант гр. ОЗВВМ-55а;
Сюзяев Александр Сергеевич,
магистрант гр. ОЗВВМ-55а,
ДОННАСА-филиал НИУ МГСУ

ИССЛЕДОВАНИЕ БАКТЕРИЦИДНОГО ДЕЙСТВИЯ АЗОТНОЙ КИСЛОТЫ НА БГКП В ИЛОВОЙ ВОДЕ ИЗБЫТОЧНОГО АКТИВНОГО ИЛА

Согласно требованиям к обеззараживанию осадков сточных вод, их обработка должна обеспечивать эпидемиологическую безопасность. Установлено, что подкисление является эффективным методом инактивации патогенной микрофлоры. Рассмотрена возможность применения азотной кислоты для обеззараживания жидкой фазы (иловой воды) избыточного активного ила. В результате лабораторных исследований показано, что подкисление пробы иловой воды до уровня pH 4,5 и ниже приводит к полному отсутствию роста обобщённых колиформных бактерий, E. coli, энтерококков и колифагов, что соответствует показателю «не обнаружено». Рекомендуется метод кислотной коррекции среды как эффективный и управляемый технологический приём для локального обеззараживания возвратной иловой воды на очистных сооружениях.

Ключевые слова: активный ил, иловая вода, обеззараживание, азотная кислота, pH, БГКП, колифаги, очистка сточных вод.

Abstract. According to the requirements for wastewater sludge disinfection, its treatment must ensure epidemiological safety. It has been established that acidification is an effective method for inactivating pathogenic microflora. The possibility of using nitric acid for disinfecting the liquid phase (sludge water) of excess activated sludge has been considered. As a result of laboratory studies, it was shown that acidification of a sample of settling water to a pH level of 4.5 or lower leads to a complete absence of growth of generalized bacteria of Escherichia coli, E. coli, enterococci, and coliphages, which corresponds to the "not detected" indicator. The method of acid correction of the environment is recommended as an effective and controlled technological approach for the local disinfection of recycled sludge water at wastewater treatment facilities.

Keywords: activated sludge, silt water, disinfection, nitric acid, pH, BOD, coliphages, wastewater treatment.

Безопасная утилизация осадков сточных вод, в частности избыточного активного ила, представляет собой значительную экологическую и эпидемиологическую проблему как в Донецкой Народной Республике, так и во всём мире. Активный ил является концентратом патогенных микроорганизмов, яиц гельминтов и токсичных веществ, что требует его обязательного обеззараживания перед дальнейшим использованием или размещением. Основные международные и национальные требования сводятся к тому, чтобы обработанный ил был стабилизирован, безопасен в санитарно-эпидемиологическом отношении и минимизировал негативное воздействие на окружающую среду [1].

Для достижения этих целей каждая страна или регион опирается на собственные нормативные документы. В Российской Федерации, чьи нормативы часто используются в

качестве основы, ключевыми документами в этой области являются СанПиН 2.1.7.1386-03 «Гигиенические требования к устройству и содержанию полигонов для твёрдых бытовых отходов» [2] и «Правила охраны поверхностных вод» [3]. Они устанавливают предельно допустимые концентрации (ПДК) патогенов и индикаторных микроорганизмов, таких как бактерии гр. кишечной палочки (БГКП), энтерококки и яйца гельминтов, в осадках, направляемых на полигоны или в сельское хозяйство.

Обеспечение санитарной безопасности осадков является приоритетной задачей для предприятий водно-коммунального хозяйства. Соответствие установленным микробиологическим нормативам — это гарантия предотвращения вспышек инфекционных заболеваний и загрязнения почв и водных объектов. Поэтому разработка, внедрение и контроль эффективных методов обеззараживания должны быть постоянным процессом, находящимся в фокусе внимания технологических служб и контролирующих органов.

Нормативные требования к обеззараживанию ила напрямую определяют выбор технологических решений на очистных сооружениях. Традиционно применяются методы обработки известью (подщелачивание), термофильное сбраживание, компостирование и термическая сушка. Однако каждый из этих методов имеет существенные недостатки: высокие энергозатраты, длительность процесса, большой объём реагентов или риск вторичного биогенного загрязнения после хранения [4]. Соблюдение ужесточающихся норм может послужить стимулом для поиска и внедрения альтернативных, более экономичных и управляемых способов инактивации патогенной микрофлоры.

Ситуация на канализационных очистных сооружениях крупных городов, таких как г. Донецк, осложнена исторически сложившимися инфраструктурными условиями. Мощности сооружений, построенных в 1970-80-х годах, были рассчитаны на прогнозируемый рост населения и промышленности. Однако социально-экономические изменения последних десятилетий привели к изменению баланса: при сохраняющейся или даже снижающейся гидравлической нагрузке на КОС, концентрация загрязняющих веществ, в том числе и микробиологических, остаётся значительной. Это создаёт специфическую нагрузку на стадию обработки осадков.

Образующийся избыточный активный ил после уплотнения и обезвоживания разделяется на твёрдую фазу (кек) и возвратную иловую воду. Именно иловая вода, направляемая в начало технологической линии очистки, представляет собой скрытый источник вторичного микробного загрязнения. В ней содержатся высокие концентрации взвешенных веществ, азотных соединений и, что наиболее критично, индикаторных и потенциально патогенных бактерий и вирусов. Стандартная практика возврата этой воды без предварительного обеззараживания ведёт к рециркуляции патогенов в системе и снижению общей эпидемиологической безопасности процесса очистки.

Таким образом, возникает технологическая необходимость в разработке локальных решений для обеззараживания возвратной иловой воды. Одним из перспективных направлений является применение химических методов, в частности, коррекции pH среды. В отличие от масштабной обработки всего объёма ила, точечное воздействие на иловую воду требует меньших доз реагентов, легко управляется и может быть интегрировано в существующую технологическую схему с минимальными капитальными затратами. Исследование эффективности конкретных реагентов, таких как азотная кислота, для решения этой задачи является актуальным и практически значимым.

Объектом исследований служила водно-иловая смесь, отобранная из колодца после вторичных отстойников на городских очистных сооружениях канализации (КОС) г. Донецк. Концентрация активного ила в смеси составляла 2,32 г/л. Исходная микробиологическая обсеменённость по показателю БГКП составляла 10^5 – 10^6 КОЕ/100см³, что характеризует её как высокую экологическую опасность и подтверждает необходимость обеззараживания.

Эксперимент по подкислению проводился в лаборатории «ДОННАСА». В пробу водно-иловой смеси объемом 0,5 л ступенчато вносили 57%-ю азотную кислоту порциями по 0,1 мл с промежуточным перемешиванием и контролем pH с помощью портативного pH-метра «Экоэксперт». Были установлены три целевых значения кислотности: pH 3,0; 3,9 и 4,5. После достижения и стабилизации заданного уровня pH каждая опытная проба доставлялась в аккредитованную лабораторию филиала «Центральная контрольно-исследовательская проектно-изыскательская водная лаборатория Вода Донбасса филиал» для проведения микробиологического анализа. Параллельно отбиралась и анализировалась контрольная проба исходной водно-иловой смеси без подкисления.

В лаборатории из доставленных проб методом декантирования отбиралась жидкая фаза (иловая вода) для анализа. Микробиологический анализ выполнялся в соответствии с требованиями ГОСТ Р 71327. Определение обобщенных колиформных бактерий (БГКП) в жидкой фазе проводили методом мембранной фильтрации. Учёт *Escherichia coli* и энтерококков осуществляли аналогичным методом на соответствующих селективных средах. Титр колифагов определяли методом двухслойных агарных культур. Для культивирования использовали суховоздушные термостаты ТС-80 и низкотемпературный инкубатор «HERAEUS BK 6160 KP». Учёт результатов проводили через 24-48 часов инкубации в зависимости от гр. микроорганизмов.

Результаты микробиологического анализа жидкой фазы (иловой воды) после экспозиции в подкисленной среде представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты микробиологического анализа иловой воды после подкисления азотной кислотой

№ п/п	Наименование показателей	Единицы измерения	Результаты испытаний			НД на методы испытаний
			Проба 1 (Ph=3,0)	Проба 2 (Ph=3,9)	Проба 1 (Ph=4,5)	
1	2	3	4	5	6	7
1	Обобщенные колиформные бактерии	КОЕ/100 см ³	н/о	н/о	н/о	ГОСТ Р 71327, п.9.1
2	<i>Escherichia coli</i> (E.coli)	КОЕ/100 см ³	н/о	н/о	н/о	ГОСТ Р 71327, п.9.3
3	Энтерококки	КОЕ/100 см ³	н/о	н/о	н/о	ГОСТ Р 71327, п.9.7.3
4	Колифаги	БОЕ/100 см ³	н/о	н/о	н/о	ГОСТ Р 71327, п.11

Как следует из данных таблицы, подкисление азотной кислотой до уровня pH ≤ 4,5 приводит к полной инаktivации широкого спектра индикаторных микроорганизмов в иловой воде. Эффект наблюдается как для грамотрицательных бактерий (БГКП, *E. coli*), так и для грамположительных энтерококков, а также для бактериофагов (колифагов), являющихся устойчивыми вирусными индикаторами. Важно отметить, что бактерицидный эффект достигнут уже при pH 4,5, что указывает на высокую чувствительность аутохтонной микрофлоры ила к сдвигу pH в кислую область.

С практической точки зрения, метод локального подкисления возвратной иловой воды азотной кислотой представляет значительный интерес. В сравнении с традиционным известкованием (подщелачиванием), требующим больших масс реагента для существенного изменения pH, кислотная обработка для достижения pH 4,0-4,5 может оказаться менее затратной по объёму реагента. Кроме того, азотная кислота, разлагаясь, может служить дополнительным источником биодоступного азота (нитратов) при возврате обработанной

воды в начало биологической очистки, потенциально снижая потребность во внешних азотных добавках.

Список литературы

1. Могукало, А. В. Комплексная обработка избыточного активного ила от патогенной обсемененности: дисс. ... канд. техн. наук: 2.1.4 / А. В. Могукало; Донбасская нац. акад. строит-ва и архитектуры. — Макеевка, 2023. — 124 с. — Текст: электронный // ДонНАСА: [сайт]. — URL: https://donnasa.ru/docs/DS/D_01.005.01/Mogukalo_A.V/dissertaciya_mogukalo_a.v.pdf (дата обращения: 2.02.2026).
2. Гигиенические требования к устройству и содержанию полигонов для твердых бытовых отходов: СанПиН 2.1.7.1386-03: утв. Глав. гос. сан. врачом РФ 11.06.2003. — Введ. 15.06.2003. — Москва: Минздрав России, 2003. — 23 с. «Правила охраны поверхностных вод»
3. Правила охраны поверхностных вод: утв. Гос. ком. СССР по охране природы 21.02.1991. — Москва, 1991.
4. Большаков, А. М. 4.2.6.4. Очистка, обеззараживание и обезвреживание сточных вод / А. М. Большаков // Гигиена: учебник. В 2 ч. Ч. 2. Частные вопросы гигиены / под ред. А. М. Большакова. — Текст: электронный // Studfile: [сайт]. — URL: <https://studfile.net/preview/6853866/page:5/> (дата обращения: 2.02.2026).

628.543.2

Могукало Анастасия Вадимовна,
к.т.н., доцент каф. ВВ и ОВР;
Платонов Андрей Игоревич,
магистрант гр. ВВм-52а;
Лазаревич Елена Владимировна,
магистрант гр. ОЗВВм-55а,
ДОННАСА-филиал НИУ МГСУ

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ИЗБЫТОЧНОГО АКТИВНОГО ИЛА МЕТОДОМ ФЕНТОНА

Избыточный активный ил характеризуется высоким содержанием связанной влаги и плохой водоотдачей, что определяет высокие затраты на его обработку. Ключевым фактором, ухудшающим обезвоживание, являются внеклеточные полимерные вещества. В статье рассматривается применение окислительного процесса Фентона для кондиционирования избыточного активного ила. Приводятся экспериментальные данные, демонстрирующие, что оптимальное соотношение реагентов $H_2O_2:Fe^{2+} = 2:1$ позволяет снизить удельное сопротивление фильтрации ила с $1300 \cdot 10^{10}$ до $400 \cdot 10^{10}$ см/г и достичь влажности кека 72% после механического обезвоживания.

Ключевые слова: избыточный активный ил, обезвоживание, кондиционирование, процесс Фентона, удельное сопротивление, влажность, кек.

Обработка и утилизация осадков сточных вод представляют собой одну из наиболее сложных и ресурсоемких задач в области водоотведения. Рост объемов образования осадков, ужесточение экологических и санитарно-гигиенических нормативов, а также высокие эксплуатационные расходы на их обезвоживание и транспортировку обуславливают необходимость поиска и внедрения эффективных технологий кондиционирования [1,2]. Особую актуальность эта проблема приобретает в отношении избыточного активного ила (ИАИ), который составляет значительную долю всех образующихся на очистных сооружениях осадков [3].

Существующие методы кондиционирования ила разделяются на химические и физические. Химическая обработка (солями металлов, полимерами) увеличивает массу конечного продукта и не всегда даёт нужный результат. Физические методы (термические, ультразвуковые) эффективны, но требуют больших энергозатрат и капиталовложений [4...7]. Поэтому поиск новых, более эффективных технологий остаётся актуальным.

Одним из перспективных направлений являются передовые окислительные процессы, в частности, реакция Фентона. Она основана на генерации в кислой среде высокоактивных гидроксильных радикалов из перекиси водорода в присутствии солей железа. Эти радикалы способны разрушать сложные органические молекулы, входящие в состав внеклеточных полимерных веществ, что способствует улучшению обезвоживания осадка. Ключевым фактором для протекания этой реакции является поддержание строго определённой кислотности среды (рН 2,5–3,5). В щелочных условиях процесс резко теряет эффективность [8,9].

Целью настоящего исследования являлась экспериментальная оценка эффективности процесса Фентона для интенсификации обезвоживания избыточного активного ила.

Объектом исследования служил избыточный активный ил, отобранный на городских очистных сооружениях. Для определения оптимальных параметров окислительной обработки

было подготовлено пять серий проб иловой суспензии. Контрольная проба (№1) не подвергалась химическому воздействию. В пробу №2 ввели 50 мг/дм³ пероксида водорода (H₂O₂) без корректировки pH. Для реализации классической реакции Фентона пробы №3-№5 предварительно подкисляли до значения pH 3,5 с целью создания оптимальных условий для активности ионов Fe²⁺ и генерации гидроксильных радикалов. В эти пробы вводили композицию реагентов H₂O₂ и FeSO₄ в следующих массовых соотношениях: 1:1 (50:50 мг/дм³), 1:2 (25:50 мг/дм³) и 2:1 (50:25 мг/дм³) соответственно.

Важным наблюдаемым эффектом стало поведение пробы №2: после добавления H₂O₂ отмечалось быстрое разложение реагента с обильным газовыделением (O₂) и последующая интенсивная флотация хлопьев, начинавшаяся через 30-45 с и завершавшаяся через 3-5 мин. (рисунок 1). В пробах №3-5, где введение FeSO₄ предшествовало добавлению H₂O₂, флотационный эффект полностью отсутствовал, что визуально свидетельствовало о протекании иных химических процессов, связанных с радикальным окислением, а не с простым разложением пероксида (рисунок 2).



Рисунок 1 – Процесс флотации биологического осадка по истечению 45 секунд



Рисунок 2 – Пробы биологического осадка после добавления сульфата двухвалентного железа и пероксида водорода

Перед оценкой фильтрационных характеристик пробы в кислой среде, подвергались нейтрализации до pH 7 с использованием 10%-ного известкового молока.

Ключевым критерием эффективности кондиционирования служило удельное сопротивление осадка (г). Удельное сопротивление осадка определялось на лабораторной установке вакуум-фильтрации. Полученные результаты представлены на рисунке 3.

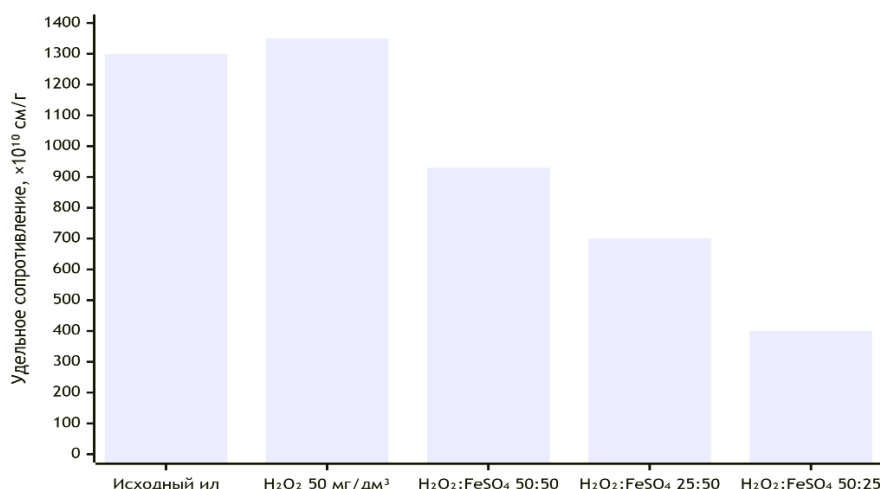


Рисунок 3 – Изменение удельного сопротивления осадка при реагентной обработке

Исходное удельное сопротивление фильтрации активного ила составляло $1300 \cdot 10^{10}$ см/г. После химической обработки этот параметр существенно изменился. При обработке только пероксидом водорода (опыт №2) сопротивление фильтрации даже возросло. Это связано с тем, что в отсутствие катализатора пероксид водорода действует как слабый окислитель. Напротив, все варианты обработки по методу Фентона (опыты №3-5) показали значительное улучшение фильтруемости:

- при соотношении $H_2O_2:Fe^{2+} = 1:1$ сопротивление снизилось до $930 \cdot 10^{10}$ см/г;
- при соотношении 1:2 – до $700 \cdot 10^{10}$ см/г;
- наибольший эффект — снижение более чем в 3 раза, до $400 \cdot 10^{10}$ см/г — был достигнут при соотношении реагентов 2:1.

Результаты вакуум-фильтрации подтвердили прямую корреляцию между снижением удельного сопротивления и улучшением водоотдачи (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты определения влажности осадка до и после введения химических реагентов

Соотношение $H_2O_2:FeSO_4$, мг/дм ³	Влажность кека, %
1	2
50:0	80
50:50 (1:1)	75
25:50 (1:2)	76
50:25 (2:1)	72

Согласно полученным результатам, применение процесса Фентона позволяет достичь значительного снижения влажности осадка. Наибольшая эффективность наблюдалась при соотношении перекиси и железа 2:1, где влажность кека снизилась до 72%. При соотношении реагентов 1:1 влажность составила 75%, а при соотношении 1:2 - 76%. Для сравнения, влажность необработанного осадка составляла 80%.

На рисунке 4 представлен внешний вид обработанного осадка (2:1) после механического обезвоживания.



Рисунок 4 – Осадок после обезвоживания влажностью 72%

Появление трещин после механического обезвоживания наглядно демонстрирует, что процесс Фентона изменил структуру ила, сделав его более пригодным для дальнейшей транспортировки.

Выводы

Высокая эффективность процесса Фентона для кондиционирования избыточного активного ила экспериментально подтверждена. Оптимальные параметры обработки для исследованного ила определены при массовом соотношении реагентов $\text{H}_2\text{O}_2:\text{Fe}^{2+} = 2:1$ и предварительном подкислении среды до pH 3,5. Данный режим обеспечил максимальное улучшение фильтруемости: удельное сопротивление фильтрации снизилось более чем в 3 раза (с $1300 \cdot 10^{10}$ до $400 \cdot 10^{10}$ см/г), а влажность обезвоженного кека после вакуум-фильтрации уменьшилась с 80% до 72%.

Список литературы

1. Обработка и утилизация осадков городских сточных вод [Электронный ресурс] : учебник / Э. П. Доскина, А. В. Москвичева, Е. В. Москвичева, А. А. Геращенко. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2019. – 220 с. – ISBN 978-5-9729-0324-5. – Текст : электронный. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/86610.html> (дата обращения: 25.01.2026).
2. Кичигин, В. И. Обработка и утилизация осадков природных и сточных вод [Электронный ресурс] : учебное пособие / В. И. Кичигин. – Самара : Самарский гос. архитектурно-строит. ун-т, ЭБС АСВ, 2008. – 204 с. – ISBN 978-5-9585-0270-7. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/20489.html> (дата обращения: 25.01.2026).
3. Исхакова, Р. Я. Обезвоживание и экологически безопасная термическая переработка избыточного активного ила / Р. Я. Исхакова, А. И. Нургалиев // Безопасность техногенных и природных систем. – 2024. – № 2. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obezvozhivanie-i-ekologicheski-bezopasnaya-termicheskaya-pererabotka-izbytochnogo-aktivnogo-ila> (дата обращения: 25.01.2026).
4. Мисбахов, Р. Ш. Ячеечная модель фазового перехода в сферической капле при охлаждении / Р. Ш. Мисбахов, В. Е. Мизонов // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2015. – № 8. – С. 71–74.
5. Мисбахов, Р. Ш. Моделирование теплопроводности в составной области с фазовыми переходами / Р. Ш. Мисбахов, В. Е. Мизонов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 4. – С. 39–43.
6. Методы предотвращения загнивания осадков [Электронный ресурс]. – URL: http://ohranabgd.ru/prombit/prombit1_28.html (дата обращения: 25.01.2026).

7. Зайнуллин, Р. Р. Применение процессов замораживания и оттаивания осадков сточных вод / Р. Р. Зайнуллин, А. А. Галяутдинов // Инновационная наука. – 2016. – № 6. – С. 72–74.
8. Исаев, А. Б. Новые технологии очистки сточных вод от красителей на основе окислительных процессов / А. Б. Исаев, А. Г. Магомедова // Вестник Московского университета. Серия 2. Химия. – 2022. – № 4. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/novye-tehnologii-ochistki-stochnyh-vod-ot-krasiteley-na-osnove-okislitelnyh-protsessov> (дата обращения: 25.01.2026).
9. Клещева, Р. Р. Особенности фазообразования при окислении водных растворов FeSO_4 и (или) суспензий $\text{Fe}(\text{OH})_2$ кислородом воздуха / Р. Р. Клещева, М. А. Попов, Д. Г. Клещев, А. В. Толчев // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математика. Механика. Физика. – 2003. – № 4. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-fazobrazovaniya-pri-okislenii-vodnyh-rastvorov-feso4-i-ili-suspenziy-fe-oh-2-kislorodom-vozdusha> (дата обращения: 25.01.2026).

628.336

Могукало Анастасия Вадимовна,
к.т.н., доцент каф. ВВ и ОВР;
Спивак Артем Геннадиевич,
Рошин Сергей Константинович,
магистранты гр. ОЗВВм-55а,
ДОННАСА-филиал НИУ МГСУ

ХАРАКТЕРИСТИКА, ОБРАЗОВАНИЕ И ПУТИ УТИЛИЗАЦИИ ОСАДКОВ ГОРОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД

В статье рассматриваются качественные характеристики осадков городских сточных вод, их классификация в зависимости от этапа очистки. Приводятся данные о мировых и национальных масштабах образования осадков, подчеркивается острота проблемы их накопления и негативного воздействия на окружающую среду. Основное внимание уделяется анализу современных методов утилизации и обработки органических осадков. Рассматриваются технологии сжигания и пиролиза, их достоинства и недостатки. Освещаются перспективные направления повторного использования ила: в качестве органоминерального удобрения, биофлокулянта, а также для получения белково-витаминных добавок и строительных материалов.

Ключевые слова. Осадки сточных вод, избыточный активный ил, утилизация осадков, обработка осадков, сырой осадок, обезвоживание, сжигание, пиролиз, биогаз, удобрения на основе осадка, экологическая безопасность, очистные сооружения.

Объемные и качественные характеристики осадков сточных вод напрямую зависят от состава исходных сточных вод, технологической схемы очистки и режимов эксплуатации сооружений. В среднем удельный выход осадка варьируется от 0,5 до 2,0 % от суточного расхода очищаемой воды. С технологической точки зрения осадки классифицируют по происхождению, степени опасности и биохимической стабильности. В зависимости от этапа очистки различают несколько типов осадков [1].

Крупные отбросы, задерживаемые решетками, подлежат обязательному удалению, их объем невелик и составляет порядка 8–40 л в год на одного жителя. Современные решения предполагают автоматизированное прессование этой фракции для снижения влажности и объема, после чего брикеты направляются на утилизацию [2].

Минеральные примеси (песок), выделяемые в песколовках, отличаются инертностью и не подвержены гниению. После обезвоживания этот материал может найти применение в дорожном строительстве или при планировке территорий.

Сырой осадок из первичных отстойников представляет собой гомогенную массу серого или темно-коричневого цвета с резким запахом. Его количество определяется эффективностью осаждения взвешенных веществ. Влажность этой фракции достигает 93–95%, а структура носит гелеобразный коллоидный характер, что крайне затрудняет механическое обезвоживание. Для улучшения водоотдачи требуется кондиционирование, чаще всего с использованием флокулянтов, способствующих укрупнению частиц.

Высокое содержание органического вещества (до 75–80%) предопределяет склонность сырого осадка к сбраживанию. Этот процесс, протекающий в метантенках, позволяет получать биогаз — смесь метана, углекислого газа и примесей. Однако широкое внедрение такой технологии сдерживается значительными капитальными затратами, сложностью управления процессом, чувствительностью микрофлоры к внешним факторам и необходимостью

дальнейшей обработки сброженной массы. Коррозионная активность биогаза, обусловленная присутствием сероводорода, также требует применения специальных материалов и оборудования. Сырой осадок содержит макроэлементы (азот, фосфор, калий), что теоретически позволяет рассматривать его как потенциальное органоминеральное удобрение. Однако использование осадка в этом направлении напрямую лимитируется его высокой эпидемиологической опасностью и возможным присутствием тяжелых металлов. Микробное число может достигать 10^{12} КОЕ/г, концентрация бактерий гр. кишечной палочки — 10^9 КОЕ/г, а содержание яиц гельминтов варьируется от 100 до 10 000 экземпляров на литр. Патогенная микрофлора осадка напрямую коррелирует с составом поступающих стоков и подвержен сезонным колебаниям [3].

Активный ил, в отличие от сырого осадка, является ключевым агентом биологической очистки. Его микрофлора окисляет органические загрязнения, обеспечивая удаление азота и фосфора, а также формирует хлопья, легко отделяемые от очищенной воды. Прирост активного ила зависит от нагрузки по загрязнениям и может быть рассчитан исходя из концентрации взвешенных веществ и биологического потребления кислорода. После вторичного отстаивания биомасса разделяется на возвратный ил, вновь поступающий в аэротенки, и избыточный ил, подлежащий дальнейшей обработке. Влажность избыточного активного ила чрезвычайно высока (до 99,7%) [3].

Масштабы образования данных осадков приобрели глобальный характер. Суммарный мировой объем осадков оценивается в 200 млрд тонн ежегодно. Так, в Китае только муниципальные очистные сооружения в 2019 году произвели порядка 11,2 млн тонн сухого вещества осадка. В Республике Беларусь этот показатель колеблется в пределах 180–197 тыс. тонн в год. В России ежегодно образуется свыше 100 млн м³ осадков.

На сегодняшний день основной проблемой при эксплуатации канализационных очистных сооружений является обработка и размещение органических осадков в виде избыточного активного ила. Основное количество илов накапливалось и продолжает накапливаться в необработанном виде на иловых площадках, в отвалах, оврагах, балках, что оказывает самое негативное влияние на экологическую обстановку и занятие под хранения земельных площадей. Объясняется это тем, что на многих очистных станциях отсутствуют стадии обработки органического осадка с завершающим этапом – утилизацией.

Повторное использование ила реализуется в нескольких направлениях, основными из которых являются: применение в качестве удобрительного материала для неплодородных почв, биофлокулятов, белково-витаминной добавки, топлива и строительных материалов.

Особое внимание утилизации органических осадков уделяется в Китае. К концу 2019 г. на муниципальных очистных сооружениях в Китае образовалось 39 млн. тонн органического осадка 80 % -ой влажности. При этом 29 % осадков было утилизировано в качестве удобрения, 27 % подвергались сжиганию, 20 % складировано на специализированных свалках в нестабилизированном виде [5].

В Российской Федерации практически половина осадков без всякой дополнительной обработки складировается на иловых площадках, 26 % используется для получения биогаза с последующим сбросом в накопители и только 4 % в качестве удобрения (рисунок 1). Низкий процент повторного использования ила указывает на отсутствие технологических решений обработки ила от болезнетворных микроорганизмов.



Рисунок 1 – Утилизация активного ила в Российской Федерации

В Японии с начала 1980-х годов и по настоящее время самым распространённым способом утилизации осадков является сжигание [9, с.4]. Сжигание биологического ила сопровождается процессом окисления органической части осадка при высоких температурах (800 – 1000°C), с получением газообразных продуктов и минерального остатка (зола). Полученную золу осадка можно применять в производстве строительных материалов. Это обуславливается тем, что по содержанию СаО зола осадка значительно превосходит золы тепловых станций, что благоприятно влияет на конструкцию бетона. Достоинства метода сжигания заключаются в значительном уменьшении осадка, компактности оборудования [5]. Из недостатков можно выделить то что, обладая высокой влажностью осадок имеет свойство медленно испаряться, а это в свою очередь может привести к засорению газоходов и теплообменных аппаратов.

Пиролиз, или сухая перегонка, представляет собой процесс термической переработки активного ила путем высокотемпературного нагрева без доступа воздуха. Применение пиролиза осадков сточных вод, имеет некоторые преимущества по сравнению с сжиганием. Например, преобразование горючих газов в электроэнергию может быть достигнуто более эффективно. Кроме того, могут быть получены ценные газы, которые можно использовать в качестве топлива [6]. Получаемые продукты после пиролиза можно использовать в некоторых отраслях, например, полученный биоуголь может быть использован, в качестве адсорбента для очистки сточных вод. Проводимые результаты показали, что образованный уголь в процессе пиролиза, обладает большой поверхностью микропор и значительной адсорбционной способностью по сравнению с коммерческим активированным углем [6]. К недостаткам данного метода можно отнести высокую пожароопасность, в связи с этим его использование требует особого внимания, так как наличие легковоспламеняющихся веществ требует дополнительного контроля при использовании данного метода. Также недостатком пиролиза, является потеря органического вещества, а также вывод из сферы биологического круговорота некоторых биофильных макро- и микроэлементов.

Ил характеризуется содержанием почти всех витаминов гр. **В**: В настоящее время в Японии имеются разработки производства, вырабатывающее витамин **В₁₂** на базе активного ила. Важными при этом являются вопросы токсичности биомассы. Опыт использования биомассы отработанного активного ила, как кормовой добавки дает в отдельных случаях положительные результаты. При этом известны условия получения белкового препарата из активного ила. Наиболее целесообразным режимом выделения белка из биомассы активного ила является температура термообработки 130 - 135 °С, время термообработки 20 - 30 мин, pH

9,0, при соблюдении которых выход белка составляет около 65%. Такой белковый препарат при определенных условиях может быть рекомендован в качестве кормовой добавки.

В научных работах Ксенофонтова Б.С. [7] рассматривается возможность об использовании избыточного активного ила в качестве биофлокулянта. Авторами отмечено, что применение активного ила для флокуляции способствует снижению концентрации взвешенных веществ, содержащихся в сточных водах на 60-70 % и биологическое потребление кислорода на 15-25 %. Данный метод утилизации позволяет не только его частично утилизировать, но и также сократить расход синтетического флокулянта, который применяется для очистки сточных вод.

Поскольку избыточный активный ил содержит ценные удобрительные вещества (азот, фосфор, калий и другие элементы) и поэтому может использоваться в качестве удобрений. При использовании осадка в качестве удобрений необходимо, чтобы они соответствовали следующим техническим требованиям [8]. Первоначально опыты по изучению использования осадка в качестве удобрения были проведены П.С. Севостьяновым (1931-1937), который сделал заключение, что данные осадки могут приравняться к навозу и минеральным удобрениям. Также работы по изучению влияния осадка на свойства почвы проводились В.И. Дмитриевой, П.А. Гордиенко, Н.П. Решецким, В.А. Касатиковым, Т.С. Кореновой, М.А. Симоном и другими исследователями. Установлено, что под влиянием осадков значительно уменьшается кислотность почв и увеличивается содержание азота, гумуса и фосфора. При этом отмечается, что накопление калия в почве не происходит, так как в иле недостаточно этого элемента. Попадая в почву, осадок окончательно минерализируется при этом азот, фосфор и другие элементы питания переходят в доступные для растения соединения. Например, увеличение собранного урожая зерновых культур, от внесения удобрения на основе избыточного активного ила в дозировке 30 т/га сухого вещества составило 20-25%, при этом сбор сена от внесения удобрения 10 и 30 т/га урожай повысился на 6,6 и 19,7%.

При использовании осадков сточных вод в качестве удобрений, они могут применяться в жидком виде без обработки или с минимальной обработкой - уплотнением. Эти жидкие текучие осадки влажностью 99,7-93,0% чаще всего перекачиваются по трубам непосредственно на поля через распределительные устройства или через накопители, расположенные в центре удобряемых участков [9]. Широкое использование осадка без обработки в качестве удобрительного материала сдерживается его объективными недостатками: наличием специфического запаха, высокой вязкостью, непривлекательным товарным видом, бактериальной загрязненностью, превышающей требования к осадкам, применяемым в качестве удобрения.

Однако при использовании активного ила в качестве удобрений необходимо соблюдать требования СанПиН 2.1.7.573- 96 Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения; ГОСТ Р17.4.3.07-2001 Охрана природы. Поэтому перед использованием избыточного активного ила как удобрения, он должен пройти обработку по обеззараживанию, извлечению ионов тяжелых металлов, для соответствия требующим нормам.

Вывод

Проведенный анализ объемов образования, состава и существующих методов обращения с осадками городских сточных вод свидетельствует о том, что данная проблема приобрела глобальный экологический и технологический характер. Мировой опыт, в частности Японии и Китая, демонстрирует переход к технологиям, позволяющим не только минимизировать объемы отходов, но и извлекать из них пользу. Термические методы (сжигание, пиролиз) эффективно решают задачу сокращения массы и обеззараживания, однако сопряжены с высокими энергозатратами, потерей ценных питательных элементов и необходимостью очистки газов.

Применение ила как удобрения способно улучшить агрохимические свойства почв и замкнуть цикл питательных веществ. Однако реализация этого направления возможна лишь при условии полного обеззараживания осадка.

Список литературы

1. Туровский, И. С. Осадки сточных вод. Обезвоживание и обеззараживание / И. С. Туровский. – Москва : ДеЛи принт, 2008. – 376 с. – ISBN 5-94343-130-3.
2. Яковлев, С. В. Водоотведение и очистка сточных вод / С. В. Яковлев, Ю. В. Воронов. – Москва : АСВ, 2002. – 704 с. – ISBN 5-87829-023-2.
3. Межевова, А. С. Состав, структура и морфология осадка сточных вод / А. С. Межевова, А. Е. Новиков. [Электронный ресурс] // Известия НВ АУК. – 2021. – № 1 (61). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostav-struktura-i-morfologiya-osadka-stochnyh-vod> (дата обращения: 01.02.2026).
4. Ковалев, В. В. Теоретические и практические аспекты совершенствования процессов биогазовой технологии / В. В. Ковалев, Д. В. Унгурияну, О. В. Ковалева. [Электронный ресурс] // Проблемы региональной энергетики. – 2012. – № 1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskie-i-prakticheskie-aspekty-sovershenstvovaniya-protssesov-biogazovoy-tehnologii> (дата обращения: 01.02.2026).
5. Валиев, В. С. Анализ мирового опыта утилизации осадка городских сточных вод / В. С. Валиев, Д. В. Иванов, Р. Р. Шигудиллин. // Российский журнал прикладной экологии. – 2020. – № 4 (24). – С. 43–51.
6. Зайнуллин, Р. Р. Применение технологии пиролиза в утилизации осадков сточных вод / Р. Р. Зайнуллин, А. А. Галяутдинов. // Инновационная наука. – 2016. – № 6. – С. 80–82.
7. Гунина, Е. А. Агроэкологическая оценка осадков сточных вод очистных сооружений Южное Бутово г. Москвы для применения в агрокультуре : специальность 03.02.08 «Экология» : диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Гунина Елена Анатольевна. – Москва, 2017. – 142 с.
8. Губанов, Л. Н. Оценка токсичности осадков городских сточных вод после обработки аминокислотными композициями [Электронный ресурс] : монография / Л. Н. Губанов, С. В. Костюнина, А. С. Сироткин [и др.]. – Нижний Новгород : Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2012. – 226 с. – ISBN 978-5-87941-831-6. – Текст : электронный. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/16036.html> (дата обращения: 01.02.2026).
9. Доскина, Э. П. Обработка и утилизация осадков городских сточных вод [Электронный ресурс] : учебник / Э. П. Доскина, А. В. Москвичева, Е. В. Москвичева, А. А. Геращенко. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2019. – 220 с. – ISBN 978-5-9729-0324-5. – Текст : электронный. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/86610.html> (дата обращения: 01.12.2025).

УДК 628.35

Нездойминов Виктор Иванович,
д.т.н., профессор каф. ВВ и ОВР;
Саламба Игорь Вадимович,
магистрант гр. ВВм—52а;
Ефанов Вячеслав Александрович,
магистрант гр. ЗВВм—55а,
ДОННАСА - филиал НИУ МГСУ

ВЕРМИТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ОСАДКОВ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

В данной статье рассмотрены современные способы утилизации осадков сточных вод с использованием технологии вермикомпостирования, которая основана на получении биогумуса дождевых червей при переработке сырых осадков и аэробно стабилизированного ила. В качестве наполнителя для осадка использованы опилки древесных пород в пропорции 50:50, предварительно обработанные острым паром и высушенные при температуре 80⁰С до постоянного веса. Установлено, что субстрат сырого осадка оказывает существенное влияние на показатели состояния дождевых червей по сравнению с субстратом стабилизированного активного ила. По истечении 3-х месяцев культивирования дождевых червей в субстрате сырого осадка их плотность увеличилась в 2,8 раза, а в субстрате стабилизированного ила – в 9,6 раза.

Ключевые слова: стабилизированный ил, сырой осадок, дождевые черви, биогумус.

При эксплуатации канализационных очистных сооружений образуются и ежегодно накапливаются значительные объёмы первичных и вторичных осадков сточных вод, являющиеся экологически опасным отходом (IV класс). На современном этапе основной проблемой является обработка и утилизация образующихся осадков на очистных сооружениях, где основная задача состоит в уменьшении объема осадка и последующем преобразовании его в полезный продукт, не вызывающий загрязнения окружающей среды. Известно, что осадки богаты органическими и минеральными веществами, которые после внесения в почву благоприятно влияют на физические, химические и биологические свойства почвы, повышая урожайность [1].

Перспективным направлением переработки вторичных осадков канализационных очистных станций является получение биогумусного органического удобрения за счет разведения сапрофагов (дождевых червей), питающихся растительными остатками, включая активный ил. В кишечнике сапрофагов проходят процессы полимеризации низкомолекулярных продуктов распада органических веществ и формирования молекул гуминовых кислот. Биогумус превосходит навоз и компосты по содержанию гумуса в 4—8 раз. В нем содержится полезная микрофлора, почвенные антибиотики, отсутствуют патогенные бактерии. Во многих странах разработаны соответствующие рекомендации по применению осадков сточных вод и компостов с учетом выполнения требований экологической безопасности. На сегодняшний день недостаточно исследован процесс получения биогумуса из вторичных биологических осадков (активного ила) и сырого осадка за счет жизнедеятельности сапрофагов.

Осадки городских канализационных очистных станций являются наиболее удобным сырьем для выращивания дождевых червей. В осадках в оптимальных для червей

соотношениях имеются и биогенные элементы, микроэлементы, витамины, примеси (песок и другие абразивные вещества), необходимые для жизнедеятельности дождевых червей [2].

Дождевые черви – крупные беспозвоночные почвенные животные – сапрофаги, питающиеся отходами активного ила и растительными остатками. Пропуская их через свой кишечник, сапрофаги осуществляют разрушение и переваривание с минеральной массой почвы. Переработанный материал, представляющий собой водопрочные, водоемкие, гидрофильные структуры — гумусный комплекс, является центром микробиологической и морфологической активности. В естественных условиях червь дает еженедельно 1—2 кокона, из которых приблизительно через 3 недели выводится от 2 до 20 червячков. Через 3 месяца вылупившиеся из кокона червячки становятся половозрелыми и могут сами производить потомство. В среднем, один червь дает потомство 200—400 особей в год.

Такой гумус отличается по химическому составу от гумуса, образующегося в почве при участии только микрофлоры тем, что в кишечнике червей развиваются процессы полимеризации низкомолекулярных продуктов распада органических веществ и формируются молекулы гуминовых кислот. Они образуют комплексные соединения с минеральными компонентами почвы, прежде всего с биогенным кальцитом, и долго сохраняются в почве в виде стабильных агрегатов. При переработке органического стабилизированного ила черви поглощают и уничтожают болезнетворные бактерии, грибы и их споры.

Микрофлора активного ила является основным источником белкового питания для дождевых червей и почти полностью переваривается в их пищеварительном канале, практически отсутствуя в испражнениях. Испражнения червей содержат разнообразные ферменты, антибиотики, аминокислоты, витамины и другие биологически активные вещества. Благодаря этому взаимодействию и саморегулированию происходит обеззараживание патогенной микрофлоры. Черви выступают в этом круговороте веществ как регуляторы деятельности микроорганизмов, как санитары и дезодораторы почвосмеси. Наряду с другими положительными качествами, биогумус обладает главным достоинством, ради которого следует внедрять вермикультивирование, – это гарантированное получение биологически чистой сельскохозяйственной продукции, безвредной для человека. Кроме того, исключаются накопления избыточной массы микроорганизмов на очистных сооружениях, технология очистки приближается к малоотходным производствам.

Есть у червей и другая специфическая особенность, весьма полезная для сельского хозяйства. Она связана с мелиорированием и структурированием почв. На 1 га ухоженных пастбищ живет от 1 до 200 млн червей, которые пропускают через себя за сутки количество земли, равное массе тела. За год черви перерабатывают 400—600 т земли на 1 га площади, превратив ее при этом в гранулы-копролиты, обладающие большой водостойкостью, влагоемкостью, гидрофильностью. В результате почва становится воздухо- и водопроницаемой, гидрофильной, защищенной от воздушной и водной эрозии [3].

При обработке червями происходит частичная минерализация ила. При высокой численности червей возможно получить высокоэффективное гумусовое удобрение. В испражнениях червя содержится до 20% гумуса.

Многие исследователи рекомендуют перед переработкой органических отходов добавлять к ним наполнители [4]. В качестве наполнителей используют измельченную солому, древесные опилки, макулатуру, торф, пищевые отходы. Оптимальные доли наполнителя в составе субстрата на основе осадков сточных вод составляют 50%. Исследования показали, что сырые осадки при различных долях наполнителя губительно действуют на червей *Eisenia foetida*. Оптимальная плотность первоначальной посадки червей при вермикомпостировании субстратов на основе осадков сточных вод очистных сооружений канализации составляет 12 особей/дм³. Оптимальная температура для жизнедеятельности червей составила 16—20 °С.

В Индии изучалась способность эпигейного дождевого червя превращать первичный осадок сточных вод совместно с коровьим навозом в биогумус. Вермистабиллизация продолжалась 15 суток. Зафиксировано, что добавление 30—40% сырого осадка не оказывает отрицательного влияния на удобрительную ценность биогумуса, а также на рост *Eisenia foetida*. Результаты показали, что сырой осадок может быть преобразован с помощью дождевых червей в навоз хорошего качества путем вермикомпостирования при смешивании в соответствующем соотношении 30—40% с коровьим навозом [4]. Химический состав биогумуса, %: общий азот — 1; фосфор — 2; калий — 1,7; гумус — 20; влажность 20—25. Микроэлементы: магний, медь, марганец, кобальт, серебро и др. Микроэлементы: витамины гр. В, основной набор аминокислот.

Биомасса червя обычно содержит от 69 до 72 % сырого протеина, 6—9% липидов, от 7 до 16% азотистых веществ. Сухое вещество червя составляет от 17 до 22% его сырой массы. Белковую муку можно использовать для вскармливания свиньям, скоту, птицам, рыбам и другим животным. Особый интерес представляет использование продуктов жизнедеятельности червей и их биомассы для получения медицинских препаратов, используемых для лечения ряда тяжелых заболеваний.

На сегодняшний день в РФ недостаточно исследован процесс получения биогумуса из вторичных биологических осадков (активного ила) за счет жизнедеятельности сапрофагов.

Собственные экспериментальные исследования были направлены на изучение процесса вермикомпостирования сырого осадка и аэробно стабилизированного ила, образующихся при эксплуатации канализационных очистных сооружений г. Макеевки. Посадочный материал дождевых червей был отобран с иловых площадок канализационных очистных сооружений. Черви подобраны приблизительно одного размера, от 3 до 5 см.

Для исследований были изготовлены две лабораторные емкости (деревянные ящики) каждая с размерами: длина 20 см, ширина 5 см, высота 15 см. В нижней части контейнера просыпана песчаная основа (20 мм), и 80 мм — основной слой субстрата для закладки. Полезный объем для вермикомпостирования составил приблизительно 1 дм³. Размеры контейнера обусловлены необходимостью равномерного расселения вермикультуры по всей массе субстрата, хорошей аэрации вермикомпостируемого материала и избежания избыточного давления толщ субстрата на живые организмы.

Стартовая плотность заселения контейнера вермикультурой принята 15 особей на один литр субстрата. Начальная плотность заселения бурта червями принята в связи с предполагаемым приростом их общей биомассы и значительным увеличением общего количества особей червей за счёт обильного их размножения в процессе вермикомпостирования. Также учитывался тот факт, что большая скученность червей уменьшает их работоспособность, плодовитость и условия жизнедеятельности, начинается деградация популяции и каннибализм.

В качестве наполнителя для осадка служили опилки древесных пород, предварительно обработанные острым паром и высушенные при температуре 80⁰С до постоянного веса. Доля наполнителя в составе субстрата составила 50%. Влажность смеси поддерживалась на уровне 70%. Предварительно сырой осадок и активный процеживались для удаления крупных примесей (камни, стекло, полиэтилен и т.д.). Сырой осадок имел резко выраженный гнилостный запах и был черного цвета. Активный ил имел болотистый запах, был светло-коричневого цвета. Перед закладкой субстрат тщательно перемешивался с опилками и дополнительно увлажнялся. Сверху субстрата укладывалась рубленая солома толщиной 1,5...2 см. Контейнер накрывался сверху стеклом для уменьшения испарения влаги.

Процесс вермикомпостирования оценивали по приросту полнозрелых особей червей по истечении трех месяцев культивирования. В таблице 1 представлены показатели состояния

дождевых червей, находящихся в субстратах, содержащих 50% осадков сточных вод и 50% наполнителя.

Таблица 1 — Показатели состояния дождевых червей, находящихся в субстратах, содержащих 50% осадков сточных вод и 50% наполнителя.

Субстрат/опилки 50:50%	Плотность полнозрелых особей червей/дм ³		Увеличение плотности червей/дм ³ по истечению 3-х месяцев	Время переработки субстрата, ч	pH
	На начало эксперимента	После завершения эксперимента			
1	2	3	4	5	6
Аэробно- стабилизированный ил	15	145	108	90	7,1
Сырой осадок после первичного отстаивания	15	42	27	90	7,5

Эксперименты, проходившие в течение трех месяцев, убедительно доказали, что возможна переработка первичных и вторичных осадков городских сточных вод дождевыми червями для получения гумуса, но плотность полнозрелых особей различна. По этому показателю возможно косвенно судить об эффективности процесса вермикомпостирования осадков.

На рисунке 1 представлены результаты вермикомпостирования сырого осадка по истечении трех месяцев. Количество червей небольшое по сравнению со вторым образцом. Черви менее подвижны. Субстрат темного цвета, достаточно большое количество твердых непереработанных фрагментов осадка.



Рисунок 1 – Гумусный субстрат сырого осадка после 3-х месячного вермикомпостирования.

Характеристика гумусного субстрата стабилизированного ила после вермикомпостирования дождевыми червями. Полученный гумус однороден, легко асыпается при перемешивании. В гумусе достаточно большое количество молодых коконов.

Полученные данные в ходе исследований показали, что субстрат сырого осадка оказывает существенное влияние на показатели состояния дождевых червей по сравнению с

субстратом стабилизированного активного ила. По истечении трех месяцев культивирования дождевых червей в субстрате сырого осадка их плотность увеличилась в 2,8 раза, а в субстрате стабилизированного ила в 9,6 раза. Кроме этого, следует отметить, что в субстрате стабилизированного ила полноценные особи подвижны, а окраска более яркая. Это свидетельствует о том, что вермикомпостирование дождевыми червями следует проводить с избыточным активным илом после его аэробной стабилизации.

Полученный биогукус активного ила исследовался на санитарно-гигиенические показатели, на наличие жизнеспособных яиц и личинок геогельминтов. Микроскопическое изучение подготовленных образцов биогукуса, полученного при вермикомпостировании аэробно стабилизированного ила, показало, что наличие яиц геогельминтов, в том числе аскарид, не обнаружено в произведенном продукте. На отсутствие жизнеспособных яиц и личинок геогельминтов в биогукусе, вероятнее всего, оказала влияние ферментативная деятельность червей, сопровождающаяся выделением большого количества собственной микрофлоры, ферментов и других биологически активных веществ, обладающих антисептическими свойствами, которые препятствуют развитию патогенной флоры, в том числе яиц и личинок геогельминтов.

В анализируемых пробах биогукуса, полученного при вермикомпостировании сырого осадка сточных вод, было выявлено единичное наличие цист патогенных кишечных простейших, в том числе циста амебы Гартмана (*Entamoeba hartmanni*).

Таким образом, санитарно-гигиенические показатели биогукуса, полученного из осадков сточных вод, не являются ограничением на пути утилизации данного отхода методом вермикомпостирования.

Список литературы

1. Лотош В.Е. Утилизация канализационных стоков и осадков / Лотош В.Е. [Электронный ресурс] // STUDY LIB: [сайт]. — URL: <https://studylib.ru/doc/2098497/utilizaciya-kanalizacionnyh-stokov-i-osadkov> (дата обращения: 25.08.2023).
2. . Покровская С. Ф. Научные и практические аспекты приготовления компоста с помощью дождевых червей (вермикомпостирование) /С. Ф. Покровская — Текст: непосредственный // Информационный материал. — М., 1990. — С. 1–10.
3. Покровская, С. Ф. Вермикомпостирование / С. Ф. Покровская, Ф. Б. Прижуков — Текст: непосредственный // Земледелие. — 1990. — № 12. — С. 57–59.
4. Мухортов Д.И., Оптимизация параметров вермикомпостирования осадков сточных вод, различающихся по токсичности. /Д.И. Мухортов, В.В. Ускова — Текст: непосредственный // Вестник МарГТУ. 2008. №2. — С. 60 – 71.

УДК 628.1:004.9

Хапчук Федор Николаевич,
асист. каф. ВВ и ОВР;
Гришаев Виталий Владимирович,
магистрант гр. ОЗВВм-55а;
Комиссаренко Анжела Алексеевна,
магистрант гр. ОЗВВм-55а,
ДОННАСА-филиал НИУ МГСУ

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ВОДОСНАБЖЕНИИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ.

В условиях возрастающей нагрузки на системы водоснабжения и водоотведения (ВиВ), вызванной урбанизацией, изменением климата и высоким износом инфраструктуры, актуализируется проблема перехода от реактивных методов управления к прогнозным. Целью настоящей работы является анализ современного состояния и перспектив применения технологий искусственного интеллекта (ИИ) в водопроводно-канализационном хозяйстве Российской Федерации. В статье систематизированы ключевые методы ИИ, применимые в отрасли: нейросетевые алгоритмы (для прогнозирования аварий и режимов водоподачи), генетические алгоритмы (для оптимизации гидравлических моделей) и экспертные системы. На основе обзора пилотных проектов (Уфа, Камышилов, Кингисепп, Санкт-Петербург) выявлены основные направления цифровой трансформации. Подробно рассмотрено внедрение платформы «Цифровое ресурсоснабжение» на объектах ГУП «Белгородский водоканал», включающий интеграцию IoT-датчиков, предиктивную аналитику и диспетчеризацию. Показано, что использование ИИ позволяет перейти к управлению по фактическому состоянию оборудования, снизить энергопотребление и сократить время реагирования на инциденты. В заключении определены основные барьеры (дефицит кадров, качество данных) и перспективные направления дальнейших исследований, включая разработку самообучающихся систем и цифровых двойников городских сетей ВиВ.

Ключевые слова: искусственный интеллект, нейронные сети, машинное обучение, водоснабжение и водоотведение, цифровизация ЖКХ, предиктивная аналитика, гидравлическое моделирование, Белгородский водоканал, IoT.

Современные системы водоснабжения и водоотведения испытывают возрастающую нагрузку, обусловленную ростом городского населения, изменением климатических условий и постепенным износом инженерной инфраструктуры. Усложнение гидравлических режимов, увеличение объёмов потребления и частота экстремальных природных явлений требуют перехода от традиционного, реактивного управления к прогнозным и адаптивным методам, основанным на анализе больших данных.

Водохозяйственный комплекс сегодня не может эффективно функционировать только за счёт классических методик планирования и традиционных инженерных расчётов. Появление развитой датчиковой инфраструктуры [1], технологии IoT, потокового мониторинга качества воды и возможности интеграции разнородных источников данных создали условия для внедрения методов искусственного интеллекта, способных выявлять скрытые закономерности, которые недоступны стандартными статистическими методами.

Под искусственным интеллектом в контексте управления инженерными системами понимается комплекс алгоритмических и программных средств, позволяющих обрабатывать

большие массивы различных данных (Big Data) от SCADA-систем, датчиков IoT и ГИС. Ключевыми методами, применимыми в системах водоснабжения и водоотведения, являются машинное обучение (включая нейросетевые архитектуры) и экспертные системы. Данные методы позволяют решать задачи классификации (например, определение типа неисправности), регрессии (прогнозирование параметров) и кластеризации (группировка участков сети по степени риска), что невозможно реализовать в рамках традиционных гидравлических расчетов без интеграции с интеллектуальным анализом.

Для того чтобы нейросети могли решать эксплуатационные задачи в водопроводно-канализационном хозяйстве, необходимо обучить их на больших объемах данных, содержащих информацию о работе системы водоснабжения и водоотведения, а также о проблемах, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации[2]. Кроме того, необходимо разработать алгоритмы, которые будут использовать нейросети для анализа данных и принятия решений на основе этих данных. Например, нейросети могут быть использованы для прогнозирования возможных аварий на сетях водоснабжения и водоотведения, что позволит своевременно проводить ремонтные работы и предотвращать аварийные ситуации. Также нейросети могут помочь в оптимизации работы оборудования и повышении эффективности использования ресурсов. Например, они могут анализировать данные о потреблении воды и электроэнергии и предлагать решения по снижению затрат. Однако, стоит отметить, что использование нейросетей в водопроводно-канализационном хозяйстве требует определенных знаний и навыков, поэтому необходимо привлекать специалистов, которые смогут правильно настроить и использовать нейросети для решения эксплуатационных задач.

Одним из наиболее показательных примеров перехода от экспериментального внедрения технологий искусственного интеллекта к промышленной эксплуатации в российской практике является ГУП «Белгородский водоканал».

Традиционная система управления объектами водоснабжения предприятия базировалась на реактивном подходе: контроль осуществлялся посредством периодических объездов и визуальной диагностики технического состояния скважин, насосных станций и водозаборов. Выявление отклонений параметров (например, падения давления) требовало выезда дежурной бригады, что обуславливало значительные временные затраты и задержки при устранении нештатных ситуаций.

К 2025 году в рамках внедрения платформенного решения «Цифровое ресурсоснабжение» к системе мониторинга подключено 184 скважины [3]. Обеспечена передача данных мониторинга (давление, расход, температура, параметры работы оборудования) в режиме реального времени. Это позволило трансформировать диспетчерскую логику: вместо сплошного обследования территорий оперативное реагирование осуществляется адресно, на основе объективных данных о локализации инцидента.

Применение платформы также позволило модернизировать процедуры сезонной подготовки инфраструктуры. В отличие от ранее практиковавшихся весенних и осенних объездов, в настоящее время диагностика проводится автоматически на основе сигналов системы о предиктивных сбоях и изменении состояния оборудования. Результатом стал отказ от масштабных сезонных ревизий. Дополнительным эффектом выступила возможность дистанционного управления объектами — например, отключения электроподогрева на скважинах в период, когда он не требуется, что обеспечило снижение энергопотребления.

Благодаря платформе изменился подход к сезонному обслуживанию. Вместо традиционных весенних и осенних объездов, диагностика теперь ведется автоматически: система сама сигнализирует о сбоях или изменениях состояния оборудования. Кроме того, появилась возможность удаленного управления, например, отключения обогрева скважин, когда в нем нет нужды, что напрямую снизило энергопотребление.

Ключевым функциональным элементом системы является наличие модулей прогнозной аналитики, ориентированных на выявление вероятных перебоев и аварийных ситуаций до их наступления. Сбор и визуализация данных выступают первичным этапом; содержательный эффект цифровизации достигается именно за счёт алгоритмов предсказательного моделирования.

Для специалистов, работающих на объектах инфраструктуры (обходчиков, инженеров, ремонтных бригад) разработано мобильное приложение, обеспечивающее фиксацию данных в цифровом виде и получение производственных заданий. Руководство участка получило возможность в оперативном режиме отслеживать местоположение бригад, длительность выполнения работ и проблемные объекты на основе накопленной статистики.

Также изучен опыт разработки и внедрения электронных моделей систем водоснабжения в городах Российской Федерации (на примере работ АО «МосводоканалНИИпроект»)

Институтом «МосводоканалНИИпроект» накоплен значительный опыт в области создания и практического применения электронных моделей систем водоснабжения[4]. Разработанные специалистами института методологические подходы и алгоритмы были реализованы при выполнении проектов для таких городов, как Уфа, Иркутск, Пенза, Оренбург, Тюмень, Салават, а также для столицы Республики Беларусь — города Минска.

Традиционный подход к проектированию и эксплуатации систем водоснабжения базировался на классических инженерных расчетах и укрупненных нормативах. Однако, как показала практика, использование нормативов водопотребления, не учитывающих фактическую динамику снижения расходов в последние годы, приводит к существенному завышению требуемых мощностей и, как следствие, необоснованному росту капитальных затрат. Для решения этой проблемы потребовался переход от статических методов к динамическому моделированию на основе электронных моделей.

В ходе выполнения проектов для городов Пенза, Оренбург и Тюмень специалистами института были разработаны детализированные электронные модели систем водоснабжения. На их основе проведена сравнительная оценка перспективного развития городов в двух различных режимах: с использованием действующих нормативов СП и с использованием данных, основанных на анализе и прогнозе фактического водопотребления. Результаты моделирования показали, что применение устаревших нормативов приводит к завышению капитальных затрат в среднем на 30%. Это позволило научно обосновать и рекомендовать актуализированные значения удельного водопотребления для различных типов застройки (в диапазоне 140–220 л/сут).

Значительный объем работ был выполнен при создании укрупненной электронной модели системы водоснабжения города Минска. В основу модели была заложена условная схема водоотбора, включающая магистральные водоводы диаметром более 300 мм. Всего в модель было внесено 4800 элементов, включая 15 насосных станций и 694 узла потребителей. Крупные промышленные предприятия и повысительные насосные станции учитывались как сосредоточенные отборы с индивидуальными коэффициентами неравномерности. Калибровка модели, проведенная по 100 контрольным точкам, подтвердила ее высокую адекватность: сходимость по расходу воды от головных сооружений составила 95%, по напору — 77%.

Другим показательным примером является калибровка детализированной электронной модели города Салавата. Для ее выполнения были проведены натурные замеры свободного напора в 36 точках сети с использованием манометров ДМ02-100-2-М. Поскольку российское программное обеспечение («Zulu») не содержало встроенных функций автоматической калибровки, специалистами института был разработан собственный алгоритм на языке VBA. Алгоритм, основанный на генетическом подходе и варьировании параметров шероховатости труб в зависимости от их возраста (с использованием формулы Коппеля-Вассильева),

позволил добиться высокой точности: среднее абсолютное расхождение по напору составило всего 4,03%, а по расходам источников — 0,95%.

Разработанные электронные модели стали не просто проектным инструментом, но и основой для решения широкого круга эксплуатационных задач. Так, на модели города Тюмени была получена зависимость величины потерь воды от давления в сети, что позволило разработать программу снижения потерь. Модели позволяют выявлять проблемные участки, оптимизировать диаметры трубопроводов, выбирать места установки регуляторов давления и определять оптимальные режимы работы насосных станций.

Таким образом, опыт, накопленный АО «МосводоканалНИИпроект», демонстрирует, что внедрение электронных моделей систем водоснабжения позволяет перейти от нормативного проектирования к точному планированию, обеспечивая существенную экономию капитальных вложений и повышая эффективность эксплуатации. Ключевым фактором стала разработка собственных алгоритмических решений, компенсирующих ограниченность функционала отечественного программного обеспечения и позволяющих создавать адекватные модели высокого качества.

Помимо рассмотренных комплексных решений, в российской практике реализован ряд пилотных проектов, в которых методы искусственного интеллекта применялись для решения конкретных задач водопроводно-канализационного хозяйства [5,6]. Систематизация данных проектов представлена в таблице 1.

Таблица 1 - Пилотные проекты применения технологий ИИ в системах ВиВ на территории РФ

Объект внедрения (город/регион)	Решаемая задача	Применяемый метод ИИ	Авторы / Ответственная организация
1	2	3	4
г. Камышлов	Оценка надежности (вероятность отказов) городской водопроводной сети	Искусственные нейронные сети (ИНС)	С. А. Тимашев, Т. В. Макеева
г. Кингисепп	Оценка корректности проектных решений и эффективности эксплуатации системы водоснабжения	Кластерный анализ и алгоритмы обучения нейронной сети	С. Н. Карамбиров, П. М. Уманский
ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»	Прогнозирование режимов подачи воды	Алгоритмы искусственных нейронных сетей (ИНС)	Специалисты ГУП «Водоканал Санкт- Петербурга»
Самарская область	Выбор оптимального состава технологического оборудования для водоочистки в условиях ограниченного финансирования	Алгоритмы экспертных систем	А. В. Чуваков, С. П. Орлов

Представленные в таблице примеры свидетельствуют о широком спектре потенциальных возможностей применения ИИ в отрасли — от прогнозирования аварий до оптимизации проектных решений. Накопленный в ходе пилотных проектов опыт создает

научно-методическую базу для перехода к более широкому, масштабируемому внедрению данных технологий на предприятиях водопроводно-канализационного хозяйства.

Анализ показал, что применение ИИ в ВиВ РФ развивается по двум магистральным направлениям: а) предиктивная аналитика на основе данных с IoT-датчиков (Белгород) для снижения аварийности и энергопотребления; б) оптимизационное моделирование на основе генетических алгоритмов (МосводоканалНИИпроект) для снижения капзатрат при проектировании.

Основными барьерами, сдерживающими цифровую трансформацию, являются: фрагментарность внедрения, необходимость адаптации программного обеспечения и дефицит квалифицированных кадров.

Перспективными направлениями дальнейших исследований является разработка методов интеграции разнородных данных и создание «цифровых двойников» городских сетей ВиВ, объединяющих гидравлические модели и алгоритмы машинного обучения.

Список литературы

1. Баженов, В. И. Искусственный интеллект в сфере ВКХ / В. И. Баженов // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2024. – № 1. – С. 42-55. – EDN ZTPTSY.
2. Баженов, В. И. Роль искусственного интеллекта в предотвращении утечек воды из сетей водоснабжения / В. И. Баженов, О. Г. Примин, В. В. Баженов // Строительство: наука и образование. – 2024. – Т. 14, № 4. – С. 98-111. – DOI 10.22227/2305-5502.2024.4.98-111. – EDN ADHSRF.
3. Цифровая революция в водоканале: как технологии меняют ЖКХ // CNews.ru : [сайт]. — 23 июня 2025. — URL: https://www.cnews.ru/articles/2025-06-23_tsifrovaya_revolyutsiya_v_vodokanale (дата обращения: 19.01.2026).
4. Примин Олег Григорьевич, Григорий Николаевич Громов СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДЕЛЕЙ // IJCCSE. 2018. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovershenstvovanie-gidravlicheskih-raschetov-sistem-vodosnabzheniya-s-ispolzovaniem-elektronnyh-modeley> (дата обращения: 19.02.2026).
5. Тимашев, С. А. Оценка надежности городской водопроводной сети при дефиците информации методом искусственных нейронных сетей : препринт / С. А. Тимашев, Т. В. Макеева. — Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2023. — 78 с.
6. Нечаев Дмитрий Александрович, Орлов Сергей Павлович Оптимизация состава технологического оборудования систем промышленного водоснабжения // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2014. №2 (42). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-sostava-tehnologicheskogo-oborudovaniya-sistem-promyshlennogo-vodosnabzheniya> (дата обращения: 19.02.2026).

УДК 622.691.4

Бут Виталий Сергеевич,
магистрант гр. ЗТГВм-55а;
Дьяконенко Виталий Владимирович,
магистрант гр. ЗТГВм-55б;
Шацков Артем Олегович,
к.т.н., доцент каф. ТТГВ,
ДОННАСА-филиал НИУ МГСУ

МЕТОДЫ ЭФФЕКТИВНОГО РАЗВИТИЯ И РЕКОНСТРУКЦИИ СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ

Значительная часть газораспределительных сетей страны имеет высокий износ (в ряде регионов и системах до 30–40% превышает нормативный срок эксплуатации), что приводит к рискам аварий, потерям газа и необходимости срочной модернизации для обеспечения надёжности поставок. В рамках программ газификации на 2026–2030 годы «Газпром» и государство планируют построить десятки тысяч километров новых газопроводов и подключить сотни тысяч домовладений, что требует не только расширения, но и эффективной реконструкции существующих сетей для интеграции новых потребителей без снижения безопасности и экономичности. Развитие и реконструкция систем напрямую влияют на энергетическую безопасность страны, особенно в удалённых и новых промышленных регионах, где требуется диверсификация источников и минимизация зависимостей от старой инфраструктуры.

Ключевые слова: газоснабжение, реконструкция газопроводов, модернизация газовых сетей, цифровизация ЖКХ, бестраншейные технологии, газораспределительные системы, инфраструктура газоснабжения.

Система газоснабжения Российской Федерации представляет собой сложный технологический комплекс, обеспечивающий энергетическую безопасность страны и комфортные условия жизни миллионов граждан. По данным Федеральной службы государственной статистики, по состоянию на 2024 год протяженность газораспределительных сетей в России превышает 850 тысяч километров, охватывая более 70% населенных пунктов страны [5]. Однако масштаб инфраструктуры создает и соответствующие вызовы для ее эксплуатации и развития.

Критической проблемой отечественной газораспределительной системы является высокий уровень физического износа оборудования и сетей. Исследования показывают, что более 35% газопроводов эксплуатируются свыше нормативного срока службы, составляющего 40 лет для стальных труб [3]. Такая ситуация создает серьезные риски для безопасности населения и требует незамедлительных мер по модернизации инфраструктуры.

Анализ аварийности в системах газоснабжения демонстрирует прямую корреляцию между возрастом сетей и частотой инцидентов.

По данным Ростехнадзора, на газопроводах, срок эксплуатации которых превышает 30 лет, количество аварийных ситуаций в 4,5 раза выше, чем на новых участках сетей. Экономический ущерб от аварий, утечек газа и необходимости аварийно-восстановительных работ исчисляется миллиардами рублей ежегодно.

Географическая специфика России усугубляет проблему износа инфраструктуры. Значительная часть газопроводов проложена в регионах с экстремальными климатическими условиями:

- вечная мерзлота в северных регионах вызывает деформацию трубопроводов из-за морозного пучения грунтов;
- резкие перепады температур в континентальных зонах ускоряют коррозионные процессы;
- высокая влажность в приморских областях интенсифицирует химическое разрушение металла;
- сейсмическая активность в южных регионах требует особых конструктивных решений при прокладке сетей.

Особую озабоченность вызывает состояние внутридомового газового оборудования, значительная часть которого не соответствует современным требованиям безопасности. Системы газоснабжения многоквартирных домов, построенных в советский период, нуждаются в комплексной реконструкции, включающей замену стояков, запорной арматуры и приборов учета газа [2].

Финансирование развития и реконструкции газораспределительных систем остается сложной проблемой. Несмотря на стратегическую важность отрасли, инвестиции в модернизацию газовых сетей часто оказываются недостаточными. Программы газификации новых территорий требуют значительных бюджетных ассигнований, что создает конкуренцию за ресурсы между задачами расширения охвата газоснабжением и необходимостью реконструкции существующей инфраструктуры.

Современная инженерная наука предлагает широкий спектр инновационных технологий для эффективной реконструкции систем газоснабжения. Ключевым направлением развития отрасли стало внедрение полимерных материалов, демонстрирующих выдающиеся эксплуатационные характеристики по сравнению с традиционными стальными конструкциями [6].

Полиэтиленовые трубы высокой плотности (ПНД) произвели революцию в газораспределении. Их преимущества очевидны:

- абсолютная коррозионная стойкость, исключая основную причину разрушения стальных газопроводов;
- срок службы не менее 50 лет при сохранении всех эксплуатационных характеристик;
- масса конструкций в 5-7 раз меньше стальных аналогов, что существенно упрощает транспортировку и монтаж;
- высокая эластичность, позволяющая трубам выдерживать подвижки грунта без разрушения;
- отсутствие необходимости в катодной защите от электрохимической коррозии.

Бестраншейные технологии прокладки и реконструкции газопроводов открывают новые возможности для модернизации городских систем газоснабжения без масштабного разрушения дорожного покрытия и благоустройства. Метод горизонтально-направленного бурения позволяет прокладывать газопроводы под препятствиями — реками, автомагистралями, железными дорогами — без вскрытия поверхности [4]. Технология релейнинга, предполагающая протягивание новой полимерной трубы внутри изношенного стального газопровода, обеспечивает реконструкцию с минимальным воздействием на городскую среду.

Цифровизация газораспределительных систем формирует качественно новый уровень управления инфраструктурой. Внедрение систем диспетчеризации и телеметрии на базе технологий «Интернета вещей» (IoT) позволяет осуществлять мониторинг параметров газоснабжения в режиме реального времени [7]. Интеллектуальные датчики непрерывно контролируют давление газа в сети, выявляют утечки на ранней стадии, передают информацию в диспетчерские центры для оперативного реагирования.

Геоинформационные системы (ГИС) трансформируют подходы к управлению газораспределительными сетями. Создание цифровых моделей инфраструктуры обеспечивает:

- визуализацию всех элементов газораспределительной системы с привязкой к координатам местности;
- хранение полной технической документации в электронном формате с быстрым доступом;
- планирование оптимальных маршрутов для аварийных бригад;
- моделирование гидравлических режимов работы сетей при различных сценариях потребления.

Применение композитных материалов открывает перспективы для создания газопроводов нового поколения. Трубы из стеклопластика и углепластика сочетают легкость полимеров с механической прочностью, сопоставимой со сталью [1]. Такие конструкции особенно эффективны в условиях агрессивных сред и при необходимости прокладки газопроводов в сложных геологических условиях.

Инновационные методы диагностики технического состояния газопроводов позволяют своевременно выявлять дефекты и предотвращать аварии. Внутритрубная дефектоскопия с использованием интеллектуальных снарядов-дефектоскопов обеспечивает детальную информацию о состоянии стенок труб, наличии коррозионных повреждений, вмятин и трещин без прекращения газоснабжения потребителей. Акустические системы обнаружения утечек газа, основанные на анализе звуковых волн, позволяют локализовать место нарушения герметичности с точностью до метра.

Модульные газорегуляторные пункты (ГРП) новой генерации представляют собой высокотехнологичные комплексы, обеспечивающие автоматическое поддержание заданных параметров газа. Современные ГРП оснащаются системами телеметрии, дистанционного управления и резервирования, что гарантирует бесперебойность газоснабжения даже при выходе из строя отдельных элементов оборудования [3].

Эффективная реконструкция газораспределительных систем требует комплексного стратегического подхода, учитывающего множество взаимосвязанных факторов. Разработка программ модернизации должна базироваться на детальном техническом обследовании инфраструктуры с применением современных диагностических методов и рисков-ориентированного подхода к оценке состояния сетей.

Приоритизация объектов реконструкции осуществляется на основе многокритериального анализа. Первостепенное внимание уделяется участкам с повышенной аварийностью, газопроводам, проложенным в зонах с высокой плотностью населения, и сетям, обеспечивающим газоснабжение социально значимых объектов — больниц, школ, детских учреждений.

Методология оценки технического состояния газопроводов включает:

- анализ возраста и материала конструкций;
- изучение истории эксплуатации и аварийности конкретных участков;
- оценку коррозионного состояния с использованием неразрушающих методов контроля;
- анализ гидравлических параметров и соответствия сетей современным требованиям по пропускной способности;
- учет перспектив развития территории и прогнозируемого роста потребления газа.

Экономическая эффективность является критически важным критерием при выборе технологий и методов реконструкции. Сравнительный анализ вариантов модернизации должен учитывать не только капитальные затраты, но и долгосрочные эксплуатационные расходы, потери газа, стоимость обслуживания оборудования [2]. Применение полимерных

труб, несмотря на более высокую первоначальную стоимость по сравнению со стальными, обеспечивает значительную экономию в долгосрочной перспективе за счет увеличенного срока службы и минимальных эксплуатационных расходов.

Нормативно-правовая база, регулирующая развитие газораспределительных систем, постоянно совершенствуется. Актуализация свода правил СП 62.13330.2011 «Газораспределительные системы» и внедрение новых технических регламентов стимулируют применение инновационных технологий и повышение требований к безопасности газоснабжения. Государственная программа «Развитие энергетики», рассчитанная до 2030 года, предусматривает масштабное финансирование модернизации газораспределительной инфраструктуры.

Организационные модели реализации проектов реконструкции эволюционируют в направлении повышения эффективности использования инвестиций. Механизмы государственно-частного партнерства позволяют привлекать частный капитал для модернизации газовых сетей, сочетая государственные гарантии с предпринимательской инициативой инвесторов. Концессионные соглашения в сфере газоснабжения создают стимулы для долгосрочных инвестиций в развитие инфраструктуры.

Экологические аспекты реконструкции газораспределительных систем приобретают все большее значение в контексте глобальных климатических изменений. Снижение утечек метана — мощного парникового газа — становится важнейшей задачей модернизации газовых сетей [6]. Современные герметичные системы с полимерными трубопроводами и автоматизированными узлами учета обеспечивают минимизацию эмиссии метана в атмосферу.

Кадровое обеспечение отрасли требует системных решений. Внедрение высокотехнологичного оборудования и цифровых систем управления предъявляет новые требования к квалификации персонала газораспределительных организаций. Развитие программ профессиональной подготовки и переподготовки специалистов, способных эффективно эксплуатировать современную инфраструктуру газоснабжения, становится необходимым условием успешной модернизации отрасли.

Интеграция систем газоснабжения в концепцию «умного города» открывает перспективы для создания интеллектуальных энергетических систем. Синхронизация данных от газораспределительных сетей с информацией от других коммунальных служб позволяет оптимизировать городское хозяйство, повышать энергоэффективность и качество услуг для населения [7].

Региональная специфика определяет адаптацию универсальных технологий к местным условиям. Северные территории требуют применения морозоустойчивых материалов и специальных технологий прокладки в условиях вечной мерзлоты. Южные регионы с сейсмической активностью нуждаются в усиленных конструкциях с повышенной гибкостью. Густонаселенные мегаполисы ориентированы на бестраншейные технологии, минимизирующие неудобства для жителей в период реконструкции.

Развитие и реконструкция систем газоснабжения Российской Федерации представляет собой масштабную стратегическую задачу, решение которой определяет энергетическую безопасность страны и качество жизни населения. Проведенный анализ убедительно демонстрирует, что эффективная модернизация газораспределительной инфраструктуры возможна лишь при комплексном применении современных технологий, стратегического планирования и адекватного финансирования.

Внедрение полимерных материалов, бестраншейных технологий и цифровых систем управления формирует технологическую основу для создания газораспределительных систем нового поколения — надежных, безопасных и экономически эффективных. Переход от реактивного аварийно-восстановительного подхода к проактивной стратегии планомерной

модернизации на основе оценки технического состояния и рисков обеспечивает оптимальное использование инвестиционных ресурсов.

Особую значимость приобретает необходимость гармонизации технологического развития отрасли с экологическими требованиями. Минимизация утечек метана, повышение энергоэффективности систем газоснабжения и интеграция газораспределительной инфраструктуры в концепцию устойчивого развития городов становятся императивами современной модернизации.

Список литературы

1. Ерин Н.С., Волобуев В.А., Чурюмов Р.Д., Мартыненко Г.Н. Эффективность композитных трубопроводов в нефтегазовой отрасли // Актуальные вопросы естественнонаучных и технических дисциплин: сб. материалов XXI междунар. оч.-заоч. науч.-практ. конф. М.: Империя, 2023. С. 36–39.
2. Цицов А. А. Методика оценки технического состояния сетей газоснабжения // Актуальные исследования. – 2023. – №48 (178). Ч.I. – С. 23-26
3. Семикашев В.В., Гайворонская М.С. Анализ состояния и перспектив развития российской газовой отрасли до и после 2022 г. // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. – 2022. – №20. – С. 108-126
4. Шафигуллин И.Ш., Свалова М.В. Бестраншейные технологии восстановления и реконструкции газопроводов // Результаты прикладных и поисковых научных исследований в сфере естествознания и технологий : сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 27 декабря 2019г. Белгород : ООО Агентство перспективных научных исследований (АПНИ), 2019. С. 117-120
5. Российский статистический ежегодник. 2024: стат. сб. / Росстат. М., 2024. 633 с.
6. Романова Т. Н., Белоглазова Т. Н. эффективность газоснабжения на основе цифровой трансформации // Строительство и техногенная безопасность. – 2024. – №32 (84). – С. 63-72.
7. Куликова С.В., Рындина С.В. Цифровая экономика: интеллектуальные технологии в концепции Smart City для управления службами жилищно-коммунального хозяйства // Вестник ПензГУ. – 2022. – №2 (38). – С. 25-30.

УДК 697.9:614.841.43

Шеховцов Павел Васильевич,
магистрант гр. ЗТГВм-55а;
Цикал Игорь Николаевич,
магистрант гр. ОЗТГВм-55а;
Максимова Наталья Анатольевна,
к.т.н., доцент, доцент каф. ТТГВ,
ДОННАСА – филиал НИУ МГСУ

ПРОТИВОДЫМНАЯ ВЕНТИЛЯЦИЯ АВТОСТОЯНОК ЗАКРЫТОГО ТИПА

В статье рассматриваются актуальные вопросы обеспечения пожарной безопасности на закрытых автостоянках за счет эффективного использования систем противодымной вентиляции. Освещены основные принципы и цели противодымной защиты, нормативные. Подробно изложены методы расчета требуемых расходов воздуха, выбора типов вентиляторов и конструктивного исполнения систем. Особое внимание уделено современным тенденциям, включая использование динамических (адаптивных) систем и компьютерного моделирования (CFD) для оптимизации решений.

Ключевые слова: противодымная вентиляция, автостоянка закрытого типа, пожарная безопасность, дымовой газовый поток, задымленность, подпор воздуха, нормативные требования, CFD-моделирование.

Закрытые автостоянки (подземные, наземные встроенные) представляют собой объекты с повышенной пожарной опасностью класса Ф5.2 по функциональному назначению. Пожарная нагрузка, сосредоточенная в виде автомобилей с горючими материалами (топливо, пластмассы, резина, ткани), при возгорании приводит к развитию интенсивного пожара с высокой скоростью тепловыделения. Основную прямую угрозу для жизни людей (посетителей, персонала) и серьезное препятствие для действий пожарных подразделений создает не пламя, а быстрое распространение дыма и токсичных продуктов горения. Противодымная вентиляция (ПДВ) является инженерной системой, призванной решить эту проблему, и ее правильное проектирование, монтаж и эксплуатация – обязательное условие безопасности объекта.

Основными факторами, определяющими специфику противодымной защиты автостоянок, являются:

1. Высокое тепловыделение. Расчетная пожарная нагрузка может достигать 1400-1800 МДж/м² и более. Температура в очаге пожара в стадии объемного развития способна превышать 1000°С.

2. Интенсивное дымообразование. Горение углеводородного топлива и синтетических материалов генерирует огромное количество плотного, токсичного дыма с низкой оптической плотностью, содержащего угарный газ (СО), цианиды, альдегиды и сажу.

3. Быстрое распространение дыма. Без организованного удаления дым, поднимаясь под перекрытие, образует термодинамически устойчивый стратифицированный слой (дымовой «резервуар»), который быстро растекается по всему помещению, сокращая время безопасной эвакуации до нескольких минут.

4. Сложная геометрия пространства. Наличие колонн, балок, рампы, перепадов высот создает условия для локального накопления дыма и образования застойных зон.

5. Необходимость обеспечения доступа пожарных. Основная задача ПДВ на автостоянке, помимо обеспечения эвакуации, – создать незадымленную зону у пола для эффективного продвижения и работы расчетов МЧС.

Система ПДВ автостоянки должна решать следующие задачи:

– удаление дыма и газов из зоны пожара для предотвращения их распространения по путям эвакуации и в соседние пожарные отсеки;

– поддержание условий для безопасной эвакуации людей (обеспечение необходимой температуры, видимости и концентрации кислорода на эвакуационных путях, прежде всего у пола).

– создание условий для локализации и тушения пожара пожарными подразделениями.

– снижение термической нагрузки на строительные конструкции для сохранения их несущей способности.

– защита имущества от повреждения продуктами горения.

Проектирование систем противодымной вентиляции в Российской Федерации регламентируется строгими нормативными документами, основными из которых являются:

– Федеральный закон № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (ст. 85, 137) [3] определяет общие требования.

– СП 7.13130.2021 «Отопление, вентиляция и кондиционирование. Требования пожарной безопасности» – ключевой документ, содержащий методики расчета, требования к оборудованию и конструктивным решениям. [2]

– СП 4.13130.2021 «Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара» (требования к пожарным отсекам и секциям). [1]

– СП 1.13130.2020 «Эвакуационные пути и выходы».

Согласно СП 7.13130.2021 [2], для автостоянок закрытого типа (кроме боксовых) предусмотрена обязательная установка вытяжной противодымной вентиляции с компенсирующим притоком (подпором).

Проектирование систем противодымной вентиляции для автостоянок

1. Зонирование и определение расчетных параметров

Пространство автостоянки разбивается на дымовые зоны (секции) площадью не более 3000 м² каждая (для подземных стоянок – не более 1600 м²). Это обусловлено технико-экономической целесообразностью и эффективностью удаления дыма. Для каждой зоны расчет ведется отдельно.

Расчетный пожар принимается по «горючей нагрузке, состоящей из автомобилей». Удельная массовая скорость выгорания бензина принимается равной 0,04 кг/(м²·с).

2. Расчет вытяжной противодымной вентиляции

Требуемый расход дыма G , кг/ч, для каждой зоны определяется по формуле, основанной на конвективной составляющей тепловыделения пожара

$$G = 3584 \cdot Q_k^{1/3} \cdot Y^{5/3}, \quad (1)$$

где Q_k – конвективная часть тепловыделения пожара, кВт ($Q_k = \psi \cdot Q$, где $\psi \approx 0,7-0,8$ для автостоянок; Q – полное тепловыделение, кВт).

Y – расстояние от нижней границы дымового слоя до пола, м (принимается не менее 2,1 м для обеспечения эвакуации и работы пожарных).

Полученный массовый расход пересчитывается в объемный L , м³/ч, с учетом температуры удаляемых газов (для автостоянок обычно принимается $T = 537^\circ\text{C}$).

$$L = G/\rho, \quad (1)$$

где ρ – плотность дыма при температуре T , кг/м³.

Кратность воздухообмена в зоне пожара должна быть не менее 10 ч⁻¹.

Для компенсации удаляемого дыма и предотвращения перетекания дыма в смежные отсеки и на пути эвакуации (лифтовые шахты, лестничные клетки) организуется приток (подпор) наружного воздуха. Его расход принимается не менее 80% от объема удаляемого дыма из горящей зоны. Подача воздуха осуществляется в нижнюю часть защищаемого помещения (на уровне 0,5-1,5 м от пола). Скорость воздуха в открытых проемах (двери

эвакуационных выходов, ворота) должна быть не менее 1,5 м/с для исключения проникновения дыма. Подача не должна нарушать стратегию дымоудаления (не «сбивать» дымовой слой) и не направляться в сторону очага пожара.

Оборудование и автоматизация

Вытяжные и приточные вентиляторы систем противодымной вентиляции должны быть огнестойкими и рассчитаны на работу в течение не менее 2 часов при температуре транспортируемой среды 400°С (вытяжка) и 2 часов при 300°С (приток). Устанавливаются в отдельных огнестойких помещениях (венткамерах) или на кровле.

Воздуховоды выполняются из негорючих материалов (сталь толщиной не менее 0,8 мм) и обеспечивают предел огнестойкости не менее EI 30 (для автономных систем) или E 30 (для систем, обслуживающих одну зону). Прокладываются в огнестойких шахтах или коробах. [4,5]

Клапаны противопожарные и дымовые обеспечивают открытие/закрытие необходимых сечений по сигналу автоматики.

Автоматика. Система запускается автоматически от сигнала двух пожарных извещателей, расположенных в одной дымовой зоне, а также дистанционно от кнопок на пожарных кранах и из диспетчерской. Управление должно быть каскадным (отключение общеобменной вентиляции, открытие клапанов, запуск вентиляторов).

Современные тенденции и инновации

1) Динамические (адаптивные) системы: использование датчиков температуры, видимости и СО для управления расходом в реальном времени в зависимости от развития пожара, что повышает эффективность и снижает энергопотребление.

2) Вытяжка через перфорированные дымовые шахты: равномерное расположение дымоприемных устройств под перекрытием для быстрого и равномерного удаления дыма.

3) CFD-моделирование (Computer Fluid Dynamics): трехмерное компьютерное моделирование распространения дыма позволяет на этапе проектирования визуализировать процесс, оптимизировать расположение дымоприемников и приточных устройств, проверить эффективность системы в нестандартных планировках.

Заключение

Противодымная вентиляция закрытых автостоянок представляет собой сложную инженерную систему, от корректности расчета и реализации которой напрямую зависят жизни людей и сохранность имущества. Строгое соблюдение актуальных нормативных требований, грамотный расчет с учетом специфики пожара на автотранспорте, применение качественного сертифицированного оборудования и современных методов проектирования (включая CFD-моделирование) являются необходимыми условиями для создания надежной и эффективной системы противодымной защиты.

Список литературы

1. СП 4.13130.2021. Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара. – Введ. 2022-01-01. – М. : МЧС России, 2021. – 58 с.
2. СП 7.13130.2021. Отопление, вентиляция и кондиционирование. Требования пожарной безопасности. – Введ. 2022-01-01. – М. : МЧС России, 2021. – 81 с.
3. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : федер. закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ (ред. от 01.07.2024). – Введ. 2009-05-01 // Собрание законодательства РФ. – 2008. – № 30 (ч. I). – Ст. 3579.
4. Баратов, А. Н. Пожарная безопасность в строительстве / А. Н. Баратов, В. А. Пчелинцев. – Москва : Стройиздат, 2018. – 320 с.
5. Кошмаров, Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении : учеб. пособие / Ю. А. Кошмаров. – Москва : Академия ГПС МЧС России, 2010. – 118 с.

УДК 621.6

Удовиченко Злата Викторовна,
к.т.н., доцент, зав. кафедрой ТТГВ;
Шага Александр Александрович
магистрант гр. ОЗТГВм-55а;
Самерин Виталий Павлович,
магистрант гр. ЗТГВм-55а,
ДОННАСА – филиал НИУ МГСУ

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В статье рассмотрены современные методы комплексного мониторинга, применяемые при проектировании систем газораспределения. Проанализированы технологии IoT-датчиков, SCADA-систем, волоконно-оптических сенсоров и методов неразрушающего контроля. Показано, что интеграция систем мониторинга на этапе проектирования позволяет повысить надёжность эксплуатации на 40-60% и снизить количество аварийных ситуаций. Представлены рекомендации по выбору методов мониторинга в зависимости от условий эксплуатации.

Ключевые слова: системы газораспределения, комплексный мониторинг, надёжность, безопасность, IoT-датчики, SCADA-системы, обнаружение утечек.

Введение: Актуальность проблемы и постановка задачи

Газораспределительные системы представляют собой кровеносную систему современной энергетики, обеспечивая транспортировку топливных ресурсов от магистральных сетей непосредственно к конечным потребителям. Однако, эксплуатация данных систем сопряжена с серьёзными рисками. Статистика последних лет свидетельствует о том, что значительная часть инцидентов происходит не из-за внезапных технологических сбоев, а вследствие накопленных дефектов, коррозионного износа и внешних воздействий, которые не были своевременно выявлены [1].

Традиционный подход к обслуживанию, основанный на планово-предупредительных ремонтах и периодических обходах, постепенно исчерпывает свою эффективность. Он носит реактивный характер: меры принимаются уже после возникновения предпосылок к аварии. В связи с этим, отрасль переходит к стратегии предиктивного обслуживания, ключевым инструментом которой становится комплексный мониторинг.

Целью данной статьи является анализ современных методов мониторинга, которые целесообразно закладывать уже на этапе проектирования газораспределительных сетей. Мы рассмотрим, как интеграция датчиков, систем связи и аналитических платформ позволяет трансформировать пассивную инфраструктуру в активную интеллектуальную систему, способную самостоятельно диагностировать своё состояние. Внедрение таких решений позволяет повысить надёжность эксплуатации на 40–60% и существенно снизить вероятность аварийных ситуаций, связанных с утечками газа или механическими повреждениями [2].

Концепция комплексного мониторинга: от разрозненных данных к единой картине

Под комплексным мониторингом в контексте проектирования газораспределения понимается не просто установка датчиков, а создание многоуровневой информационной

оболочки объекта. Эта оболочка должна охватывать все критические параметры: от давления и расхода газа до вибраций грунта и концентрации метана в атмосферном воздухе.

Важно подчеркнуть, что эффективность мониторинга напрямую зависит от момента его внедрения. Попытка модернизации действующей сети часто сталкивается с трудностями доступа к трубопроводам, необходимостью остановки подачи газа и высокими затратами на земляные работы. Поэтому интеграция сенсоров в проектную документацию на стадии «П» и «Р» является экономически и технически обоснованным решением.

Современную архитектуру мониторинга можно представить как пирамиду, в основании которой лежат физические сенсоры, на втором уровне - каналы передачи данных, а на вершине - системы принятия решений. Рассмотрим основные технологические уровни более подробно.

Сенсорный уровень: разнообразие методов контроля

Выбор методов контроля определяется условиями эксплуатации участка сети. В таблице 1 приведена систематизация основных технологий, применяемых в современной практике проектирования.

Таблица 1 - Сравнительная характеристика методов мониторинга сетей газораспределения [3-6]

Категория метода	Принцип действия	Область наилучшего применения	Ключевые преимущества	Ограничения внедрения
1	2	3	4	5
Акустические и вибрационные	Регистрация звуковых волн утечки или вибраций от земляных работ	Городская застройка, зоны частых земляных работ	Высокая чувствительность, возможность точной локализации источника воздействия	Высокий уровень ложных срабатываний от городского шума
Барометрические и расходомерные	Анализ баланса давления и расхода (метод отрицательной волны давления)	Магистральные участки, пункты редуцирования	Простота интеграции в существующую КИП, низкая стоимость	Низкая чувствительность к малым утечкам, инерционность
Волоконно-оптическое (DFOS)	Анализ обратного рассеяния света в оптоволоконной трубе	Протяжённые участки, подводные переходы, сейсмоактивные зоны	Иммунитет к электромагнитным помехам, контроль на протяжении десятков км	Высокая капитальная стоимость, требуется квалифицированное обслуживание
Газоаналитические (IoT)	Прямое измерение концентрации метана в воздухе или колодцах	Подземные коммуникации, колодцы, подвалы зданий	Прямое подтверждение факта утечки, автономность	Необходимость замены элементов питания, зависимость от вентиляции
Дистанционное зондирование	Съёмка в инфракрасном и оптическом диапазонах с БПЛА или спутников	Труднодоступные местности, болотистые участки, охраняемые зоны	Охват больших территорий без физического доступа	Зависимость от погодных условий, периодичность облётов

Как видно из таблицы, ни один метод не является универсальным. Например, волоконно-оптические системы превосходно защищают от внешних механических воздействий, но могут

быть менее эффективны для обнаружения микроутечек внутри трубы без изменения температуры грунта. Поэтому при проектировании рекомендуется использовать гибридные схемы, где методы дополняют друг друга.

Технологии Интернета Вещей (IoT) в газораспределении

Одним из наиболее динамично развивающихся направлений является внедрение IoT-сенсоров. В отличие от традиционной телемеханики, IoT-устройства характеризуются высокой степенью автономности и возможностью работы в беспроводных сетях низкого энергопотребления (LPWAN), таких как LoRaWAN или NB-IoT.

Особый интерес представляет технология «сторожевых датчиков» (sentinel sensors), которые активируют полную передачу данных только при обнаружении летучих органических соединений (VOC), что позволяет значительно экономить заряд батареи.

Надёжность таких систем подтверждается расчётными показателями MTBF (Mean Time Between Failures). Для промышленных IoT-решений высокого класса этот показатель варьируется в диапазоне от 340 000 до 730 000 часов, что соответствует требованиям для оборудования, работающего в непрерывном режиме [2,5].

Роль SCADA-систем и диспетчеризации

Собранные данные бесполезны без системы управления. SCADA-системы (Supervisory Control and Data Acquisition) выступают в роли центрального мозга комплекса мониторинга. Они агрегируют потоки данных от разрозненных датчиков, визуализируют их для оператора и позволяют осуществлять удалённое управление запорной арматурой.

В современных проектах наблюдается тенденция к переходу от локальных SCADA к облачным платформам. Это позволяет использовать вычислительные мощности удалённых серверов для сложной аналитики. Например, система может автоматически сопоставлять данные о падении давления на участке с данными акустических датчиков на этом же участке, чтобы исключить ложную тревогу, вызванную изменением режима работы компрессорной станции.

Важным аспектом является интеграция с государственными системами мониторинга. Опасные производственные объекты должны передавать данные в единые центры безопасности. Проектирование интерфейсов для такой передачи должно быть заложено в проект изначально, чтобы избежать дорогостоящих доработок в будущем.

Для обоснования инвестиций в системы мониторинга необходимо оперировать конкретными метриками. В инженерной практике надёжность оценивается через вероятность безотказной работы и точность диагностики.

Особое внимание следует уделить коррозионному мониторингу. Локализованная коррозия остаётся одной из главных причин разрушения стальных труб, составляя до 30% всех дефектов. Внедрение систем постоянного контроля потенциала «труба-грунт» и установка стационарных точек ультразвукового контроля позволяет выявлять очаги коррозии на стадии, когда остаточная толщина стенки ещё позволяет безопасно эксплуатировать трубопровод, планируя ремонт в плановом порядке, а не в аварийном.

Практическая реализация и архитектура системы

При проектировании конкретной системы мониторинга инженеры сталкиваются с задачей выбора оптимальной архитектуры. На Рисунке 1 схематично изображена типовая структура взаимодействия компонентов.

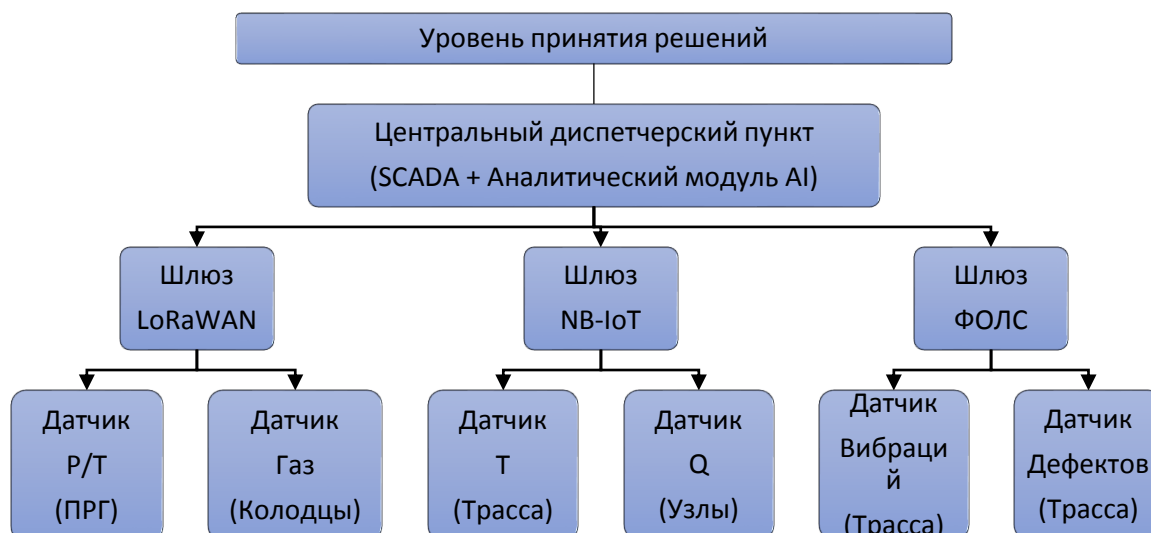


Рисунок 1 - Типовая архитектура распределённой системы мониторинга

Данная схема иллюстрирует принцип гетерогенности сети. Разные участки сети используют разные протоколы связи в зависимости от доступности инфраструктуры. Например, на пунктах редуцирования газа (ПРГ), где есть электропитание, целесообразно использовать проводные датчики давления и температуры, передающие данные по промышленным протоколам (Modbus) на локальный шлюз. На протяжённых участках трассы, где питание отсутствует, применяются автономные IoT-датчики с передачей данных по радиоканалу. Для критически важных магистралей прокладывается отдельное оптоволокно, выполняющее одновременно роль канала связи и чувствительного элемента для обнаружения вибраций.

Экономическое обоснование

Вопрос стоимости всегда является ключевым при утверждении проекта.

Анализ показывает, что наиболее быстрым эффектом обладает внедрение IoT-сенсоров, однако для комплексной защиты наиболее выгодным в долгосрочной перспективе является сочетание проводных и беспроводных технологий. Экономия формируется за счёт предотвращения потерь товарного газа, снижения штрафов со стороны регуляторов и оптимизации маршрутов ремонтных бригад [2,5].

Нормативно-правовое регулирование в Российской Федерации

Проектирование систем мониторинга в России осуществляется в строгом соответствии с требованиями промышленной безопасности. Основным документом, регламентирующим эти вопросы, является Приказ Ростехнадзора № 536 от 15.12.2020, который утверждает федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности для сетей газораспределения [7].

Документ прямо указывает на необходимость мониторинга технического состояния газопроводов. Кроме того, новый ГОСТ 34670-2020 «Системы газораспределительные. Пункты редуцирования газа» устанавливает требования к оснащению ПРГ средствами автоматического контроля и управления [8]. Это означает, что проект, не предусматривающий установку датчиков давления и загазованности с выводом сигнала на диспетчерский пункт, просто не пройдет экспертизу промышленной безопасности.

Также стоит упомянуть ГОСТ 34741-2021, который регламентирует требования к стальным газопроводам и подразумевает наличие систем защиты от коррозии, эффективность которых должна подтверждаться данными мониторинга потенциала [9]. Таким образом, нормативная база создаёт прямой запрос на внедрение комплексных решений.

На основе проведённого анализа можно сформулировать ряд практических рекомендаций для специалистов, занимающихся проектированием газораспределительных систем.

Во-первых, необходимо придерживаться принципа избыточности критических каналов. Система мониторинга не должна иметь единых точек отказа. Это достигается дублированием каналов связи (например, оптоволокно + радиоканал) и резервированием источников питания.

Во-вторых, следует внедрять адаптивные алгоритмы опроса. Постоянная передача данных со всех датчиков в высоком разрешении может перегрузить сеть. Рекомендуется использовать логику, при которой частота опроса увеличивается автоматически при фиксации отклонений параметров от нормы. Это позволяет экономить ресурс батареи и канал связи в штатном режиме, сохраняя высокую детализацию данных в аварийной ситуации.

В-третьих, важна интеграция с геоинформационными системами (GIS). Данные мониторинга должны быть привязаны к цифровой карте местности. Это позволяет оператору видеть не просто «Датчик №5 показал утечку», а «Утечка в точке с координатами X, Y, рядом с автомобильной дорогой». Такая визуализация ускоряет принятие решений в стрессовых условиях.

Наконец, нельзя забывать о кибербезопасности. Поскольку системы мониторинга становятся частью корпоративной сети и часто имеют выход в интернет, они становятся мишенью для кибератак. На этапе проектирования необходимо закладывать средства криптографической защиты данных и сегментацию сети, чтобы исключить возможность несанкционированного управления запорной арматурой.

Выводы.

Подводя итоги, можно констатировать, что применение методов комплексного мониторинга перестало быть опцией и превратилось в стандарт отрасли. Интеграция современных технологий — IoT, волоконно-оптических сенсоров, спутниковых данных и интеллектуальных SCADA-систем — позволяет перейти от ликвидации последствий аварий к их предотвращению.

Результаты анализа показывают, что надёжность систем газораспределения при внедрении комплексного мониторинга возрастает на 40–60%. Но главное преимущество заключается в сохранении человеческих жизней и защите окружающей среды. Раннее обнаружение утечек с точностью до 10 метров и временем реакции менее минуты является тем рубежом, который отделяет штатную ситуацию от катастрофы.

Экономическая эффективность таких решений подтверждена практикой: срок окупаемости составляет от 2 до 5 лет, что является приемлемым показателем для инфраструктурных проектов. При этом соблюдение требований новых ГОСТов и приказов Ростехнадзора делает внедрение мониторинга обязательным условием легальной эксплуатации объектов.

Перспективы развития направления связаны с внедрением искусственного интеллекта для прогнозной аналитики. Системы будущего смогут не просто сообщать о поломке, но и предсказывать её вероятность за недели до наступления, анализируя микротренды в данных давления и вибрации. Проектировщикам уже сегодня необходимо закладывать архитектуру, способную поддержать такие интеллектуальные нагрузки в будущем.

Список литературы

1. Услугина, А. С. Основные причины возникновения аварий и инцидентов на газопроводах / А. С. Услугина // Вестник науки, 2024. - №11 (80). – Том 4. – С. 1537 - 1541.

2. Abbas, Z. Monitoring of Gas Distribution Pipelines Network Using Wireless Sensor Networks / Z. Abbas, M. R. Anjum, M. Younus // *Wireless Personal Communications*, 2021. - Vol. 117. – P. 1-20.
3. Конохов, А.В. Технологии мониторинга и анализа данных в системах телеметрии газопроводов / А.В. Конохов // *Universum: технические науки : электрон. научн. журн.* 2024. - №9(126). – С. 19-24.
4. Руководство по безопасности "Рекомендации по обследованию подземных стальных газопроводов". Утверждено приказом ФС по экологическому, технологическому и атомному надзору от 9 октября 2023 г. N 364. – Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/407721173/>
5. Muhammad, Z. Key factors involved in pipeline monitoring techniques using robots and WSNs: Comprehensive Survey / Z. Muhammad, B. Kamarulnizam, A. Muhammad and oth. // *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2018, 9(2). – P. 04018001 – 04018015.
6. Zhao, L. A review of leak detection methods based on pressure waves in gas pipelines / L. Zhao, Z. Cao, J. Deng // *Measurement*, 2024. - Vol. 236. – P. 115062.
7. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности "Правила промышленной безопасности при использовании оборудования, работающего под избыточным давлением". Утв. Приказом Ростехнадзора от 15.12.2020 г. № 536. – Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=384352>
8. ГОСТ 34670-2020. Системы газораспределительные. Пункты редуцирования газа. Основные положения. – М. : Стандартиформ, 2020. – 26 с.
9. ГОСТ 34741-2021. Системы газораспределительные. Требования к эксплуатации сетей газораспределения природного газа. – М. : Российский институт стандартизации, 2023. – IV, 109 с.

УДК 621.6

Удовиченко Злата Викторовна,
к.т.н., доцент, зав. каф. ТГВ;
Полякова Юлия Николаевна,
магистрант гр. ЗТГВм-55а;
Сомова Светлана Дмитриевна,
магистрант гр. ЗТГВм-55а,
ДОННАСА – филиал НИУ МГСУ

ВЛИЯНИЕ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫХ И ТОПОГРАФИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СХЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ

В статье исследуется проблема повышения энергоэффективности и снижения материалоемкости систем газоснабжения на этапе проектирования. Актуальность работы обусловлена необходимостью учета комплексного влияния градостроительных и топографических условий на технико-экономические показатели газораспределительных сетей в рамках концепции энергоресурсосбережения. Целью исследования является разработка методических подходов к оптимизации схем газоснабжения с учетом плотности застройки, планировочной структуры населенного пункта и рельефа местности. В работе применены методы сравнительного анализа технико-экономических показателей, математического моделирования затрат с введением специализированных коэффициентов (топографического, стесненности застройки). Проведен анализ зависимости удельных капитальных затрат от типа застройки и перепада высот. Установлено, что игнорирование топографических факторов может привести к занижению сметной стоимости на 30–50%, а рациональный выбор трассы позволяет снизить капиталовложения на 15–25%. Особое внимание уделено взаимосвязи оптимизации пространственной структуры сетей и снижения эксплуатационных энергозатрат на транспортировку газа. Результаты исследования демонстрируют, что учет градостроительных ограничений и рельефа при выборе диаметров труб и конфигурации сети способствует уменьшению гидравлических потерь.

Ключевые слова: газоснабжение, градостроительные факторы, топография, технико-экономические параметры, оптимизация, газораспределительные сети, энергоресурсосбережение.

Введение

В современных условиях повышения требований к энергоэффективности и ресурсосбережению в инженерных системах зданий и сооружений особое значение приобретает задача оптимизации систем газоснабжения на этапе. Выбор рациональной схемы газоснабжения населенного пункта напрямую зависит от градостроительных и топографических условий, которые определяют как капитальные, так и эксплуатационные затраты [1,2].

Актуальность исследования обусловлена необходимостью снижения материалоемкости и энергоемкости газораспределительных систем при обеспечении надежности и безопасности газоснабжения потребителей [3,4].

Градостроительные факторы и их влияние на параметры газораспределительных систем

Плотность застройки является одним из ключевых градостроительных факторов, определяющих выбор схемы газораспределения. Согласно СП 62.13330.2011, выбор схем

газораспределения должен проводиться в зависимости от объема, структуры и плотности газопотребления поселений и городских округов [3].

Удельные капитальные затраты на строительство газораспределительных сетей можно определить по формуле

$$K_{уд} = \frac{K_{общ}}{N_{потр}} = \frac{\sum_{i=1}^n (L_i \cdot C_i)}{N_{потр}}, \quad (1)$$

где $K_{уд}$ – удельные капитальные затраты на одного потребителя, руб./потр.;

$K_{общ}$ – общие капитальные затраты, руб.;

L_i – протяженность газопровода i -го диаметра, м;

C_i – стоимость 1 м газопровода i -го диаметра, руб./м;

$N_{потр}$ – количество потребителей.

При высокой плотности застройки (многоэтажная жилая застройка) удельная протяженность газовых сетей на одного потребителя снижается, что приводит к уменьшению удельных капитальных затрат. В то же время, при малоэтажной застройке требуемая протяженность сетей возрастает, увеличивая материалоемкость системы.

Планировочная структура (компактная, линейная, рассредоточенная) существенно влияет на конфигурацию газораспределительной сети. Для компактной застройки характерна кольцевая или тупиковая схема с минимальной протяженностью магистральных участков. Линейная структура (вдоль транспортных магистралей) требует устройства протяженных газопроводов-водоводов, что увеличивает стоимость системы.

Таблица 1 – Влияние типа застройки на технико-экономические показатели газоснабжения [1,2,5]

Тип застройки	Плотность, чел/га	Удельная протяженность сетей, м/потр.	Относительная стоимость, %
1	2	3	4
Многоэтажная (9–16 эт.)	400–600	0,8–1,2	100
Среднеэтажная (4–8 эт.)	200–350	1,5–2,5	140–160
Малоэтажная (1–3 эт.)	80–150	3,0–5,0	220–280
Индивидуальная (сельская)	30–60	6,0–10,0	350–450

Влияние топографических факторов

Топографические условия оказывают непосредственное влияние на стоимость строительства газопроводов [6-8]. Рельеф местности определяет:

- объем земляных работ;
- глубину заложения труб;
- сложность монтажа;
- необходимость дополнительных инженерных решений.

На пересеченной местности с перепадом высот более 20 м на 1 км трассы стоимость строительства возрастает на 30–50% по сравнению с равнинными участками. Это связано с необходимостью выполнения дополнительных земляных работ, устройства подпорных стенок, применения специальных методов укладки труб [6,7].

Для учета влияния рельефа при расчете стоимости строительства вводится топографический коэффициент $K_{топ}$

$$K_{\text{топ}} = 1 + \alpha \cdot \frac{\Delta H}{L}, \quad (2)$$

где ΔH – перепад высот на участке, м;

L – протяженность участка, м;

α – эмпирический коэффициент (принимается 0,3–0,5 в зависимости от категории грунтов).

Скорректированная стоимость строительства газопровода определяется как

$$C_{\text{скор}} = C_{\text{баз}} \cdot K_{\text{топ}} \cdot K_{\text{плотн}}, \quad (3)$$

где $C_{\text{баз}}$ – базовая стоимость 1 м газопровода для равнинной местности;

$K_{\text{плотн}}$ – коэффициент плотности застройки.

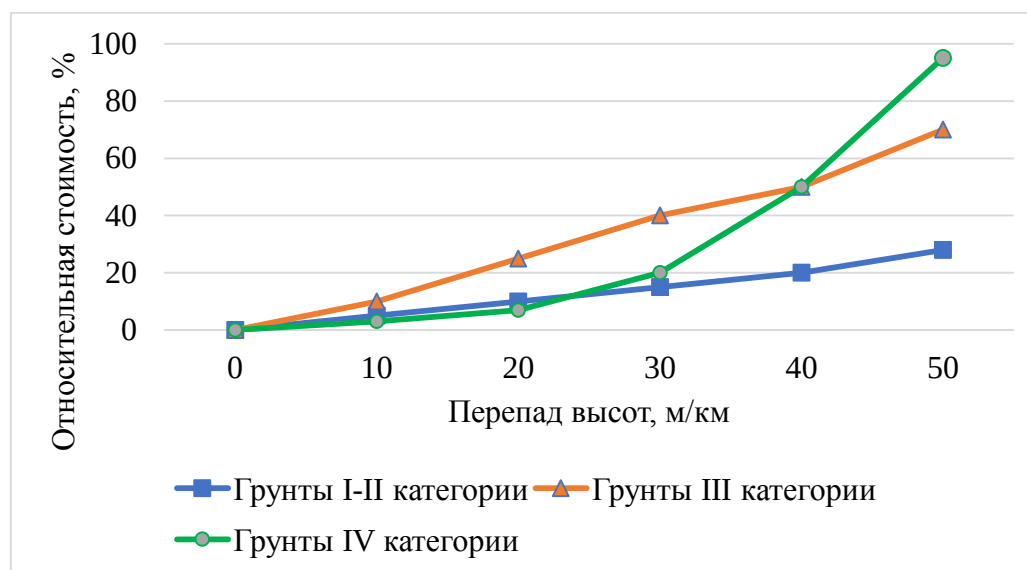


Рисунок 1 – Зависимость относительной стоимости строительства газопровода от перепада высот

На рисунке показаны три кривые для различных категорий грунтов: I–II категория (песчаные, супесчаные грунты), III категория (суглинки), IV категория (глины). С увеличением перепада высот стоимость возрастает нелинейно, причем для более тяжелых грунтов рост стоимости более выражен.

Инженерно-топографический план, получаемый в результате топографической съемки, необходим для определения подземных коммуникаций и выбора оптимальной трассы газопровода [6,7]. Ширина полосы топографической съемки для проектирования газопровода в соответствии с СП 317.1325800.2017 составляет 100 м для незастроенной территории [9].

Наличие водных преград, оврагов, болотистых участков требует применения специальных методов строительства (горизонтально-направленное бурение, надземная прокладка), что увеличивает стоимость на 40–80% [3,10].

Оптимизация схем газоснабжения с учетом градостроительных и топографических факторов

При проектировании систем газоснабжения необходимо минимизировать приведенные затраты с учетом надежности и энергоресурсосбережения. Целевая функция оптимизации имеет вид

$$Z = K + E_n \cdot I \rightarrow \min, \quad (4)$$

где K – капитальные затраты, руб.;

I – ежегодные эксплуатационные издержки, руб./год;

E_n – нормативный коэффициент экономической эффективности (принимается 0,12...0,15).

Капитальные затраты включают

$$K = \sum_{i=1}^n (L_i \cdot C_{уд} \cdot K_{топ,i} \cdot K_{стесн,i}), \quad (5)$$

где $K_{стесн}$ – коэффициент стесненности застройки (1,0...1,4).

Эксплуатационные издержки определяются по формуле

$$I = I_{ам} + I_{рем} + I_{эн} + I_{проч}, \quad (6)$$

где $I_{ам}$ – амортизационные отчисления;

$I_{рем}$ – затраты на техническое обслуживание и ремонт;

$I_{эн}$ – затраты на электроэнергию (для работы ГРП, систем контроля);

$I_{проч}$ – прочие расходы.

Особое внимание следует уделять энергосбережению при эксплуатации инженерных систем [5,8]. Применение современных материалов (полиэтиленовые трубы) и технологий позволяет снизить потери давления в сетях и уменьшить энергопотребление на транспортировку газа [10,11].

Энергоресурсосбережение в системах газоснабжения

Оптимизация схем газоснабжения с учетом градостроительных и топографических факторов напрямую способствует энергосбережению [1,2,5,11].

Основные направления энергосбережения:

- снижение гидравлических потерь за счет оптимального выбора диаметров труб и трассировки.
- применение энергоэффективного оборудования ГРП (регуляторы давления с высоким КПД).
- использование возобновляемых источников энергии для питания систем контроля и управления (солнечные панели).
- минимизация протяженности сетей, что снижает потери газа и затраты на обслуживание.



Рисунок 3 – Блок-схема методики выбора оптимальной схемы газоснабжения с учетом градостроительных и топографических факторов

Выводы

Градостроительные факторы (плотность застройки, планировочная структура) и топографические условия (рельеф, инженерно-геологические характеристики) оказывают определяющее влияние на технико-экономические параметры схем газоснабжения.

Учет данных факторов на стадии проектирования позволяет снизить капитальные затраты на 15...25% и эксплуатационные расходы на 10...15% за счет оптимизации трасс газопроводов и выбора рациональных диаметров труб.

Предложенная методика расчета с введением топографического коэффициента $K_{\text{топ}}$ и коэффициента стесненности $K_{\text{стесн}}$ позволяет более точно прогнозировать стоимость строительства и выбирать экономически целесообразные решения.

Для населенных пунктов со сложным рельефом (перепад высот более 20 м/км) рекомендуется применять комбинированные схемы с сочетанием подземной и надземной прокладки, что позволяет снизить стоимость на 12...18%.

Интеграция принципов энергоресурсосбережения в процесс проектирования систем газоснабжения обеспечивает не только экономический эффект, но и снижение энергоемкости транспортировки газа на 8...12%.

Список литературы

1. Медведева, О. Н. Разработка методических основ оптимизации энергосберегающих газораспределительных систем / О. Н. Медведева, Н. С. Бессонова // Вестник евразийской науки. - 2020. - №5. Режим доступа: <https://esj.today/13SAVN520.html>
2. Боровский Б. И. Техничко-экономическое сравнение распределительного газопровода низкого и среднего давления в населённом пункте сельской местности / Б. И. Боровский, Г. Н. Баранова // Строительство и техногенная безопасность. - 2013. - №47. С. 125-130.
3. СП 62.13330.2011. Газораспределительные системы. Актуализированная редакция СНиП 42-01-2002. – Введ. 2013-01-01. – М.: Минрегион России, 2012. – 114 с.

4. Новохатин, В. В. Комплекс геодезических работ при проектировании газопровода / В. В. Новохатин, Е. П. Евтушкова // АПК: инновационные технологии. - 2018. - № 2. - С. 24-37.
5. Алибагомедов, М. Т. Модели и средства повышения эффективности распределительных газопроводов / М. Т. Алибагомедов // Шаг в науку. - 2025. - №2. - С. 23-25.
6. Герасимов, Н. А. Геодезические работы при строительстве газопровода / Н. А. Герасимов, Б. С. Мурзабулатов // Вестник науки. - 2025. - №6 (87). - Том 3. - С. 2015 - 2022. Режим доступа : <https://www.вестник-науки.pf/article/24457>
7. Мартынова, Н. Г. Инженерно-геодезические изыскания при строительстве газопровода / Н. Г. Мартынова // International agricultural journal. - 2023. - №2. - С. 554-566.
8. Энергосбережение в системах тепло- и газоснабжения при капитальном ремонте и реновации жилого фонда / О.А. Гнездилова, Н.В. Кузнецова // Жилищное строительство. - 2020. - № 5. - С. 34-39.
9. СП 317.1325800.2017. Инженерно-геодезические изыскания для строительства общие правила производства работ. - Введ. 2018-06-23. - М.: Стандартинформ, 2018. - IV, 46 с.
10. Ефремова, Т. В. Проектирование и монтаж полиэтиленовых газопроводов : учебное пособие / Т. В. Ефремова, Е. Е. Мариненко, П. П. Кондауров, С. Н. Рябов. - Волгоград : ВолГАСУ, 2013. - 100 с.
11. Alves, O. Modeling and optimization of natural gas distribution networks for new supplier projects / O. Alves Jr, C. Fontes // Computers & Chemical Engineering. - 2022. - Vol. 145. - P. 107189. DOI : 10.1016/j.ccmx.2022.100240

УДК 622.691.4

Головач Юлия Александровна,
к.т.н., доцент каф. ТГВ;
Дудниченко Данил Александрович,
магистрант гр. ЗТГВм-55а;
Коваленко Сергей Александрович,
магистрант гр. ЗТГВм-55а,
ДОННАСА – филиал НИУ МГСУ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПАССИВНОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

В статье рассматриваются актуальные проблемы и перспективы совершенствования пассивной защиты магистральных газопроводов Российской Федерации от коррозии. Проведён комплексный анализ факторов грунтовой среды, определяющих эффективность изоляционных покрытий. Обоснована необходимость перехода от традиционных битумно-полиэтиленовых систем к инновационным технологическим решениям. Проанализирована взаимосвязь состояния пассивной защиты с развитием коррозионного растрескивания под напряжением. Предложен комплексный подход к совершенствованию защиты, включающий вероятностно-статистическую методику выбора системы покрытия, интеграцию с системами непрерывного мониторинга на основе оптоволоконных датчиков, математическое прогнозирование остаточного ресурса и региональную адаптацию материалов с учётом геоклиматических особенностей.

Ключевые слова: магистральные газопроводы, пассивная защита, антикоррозионные покрытия, нанокompозитные материалы, самовосстанавливающиеся покрытия, коррозионное растрескивание под напряжением, мониторинг целостности, прогнозирование ресурса.

Магистральные газопроводы являются важной инфраструктурой энергетической системы Российской Федерации, общая протяжённость которой превышает 175 тыс. км. Надёжность и безопасность их эксплуатации напрямую зависят от эффективности систем защиты от коррозии. Пассивная защита, основанная на применении антикоррозионных покрытий, выполняет функцию барьерного слоя между металлической поверхностью трубы и агрессивной внешней средой (грунт, грунтовые воды, микроорганизмы). В отличие от активных методов (катодная защита), пассивные системы не требуют внешнего источника и обеспечивают длительную защиту при условии сохранения целостности изоляционного слоя. Современные требования к сроку службы газопроводов и эксплуатации в экстремальных климатических условиях ставят перед отраслью задачу постоянного совершенствования материалов и технологий пассивной защиты. Актуальность темы обусловлена тем, что до 30% аварий на магистральных трубопроводах связаны с отказами систем антикоррозионной защиты, при этом дефекты покрытий являются основной причиной локализации коррозионных процессов [1-3]. Согласно статистике, в разные периоды эксплуатации на долю отказов, связанных с коррозией, в газовой промышленности приходилось от 21 до 46% всех аварий, зарегистрированных на трубопроводах.

Традиционные системы пассивной защиты, такие как битумно-мастичные покрытия и двухслойная полиэтиленовая изоляция, исчерпали свой технологический потенциал. Основные проблемы существующих решений включают: низкую адгезию к металлической поверхности при нарушении технологии подготовки; склонность к отслоению покрытия под воздействием температурных циклов и механических нагрузок; недостаточную стойкость к УФ-излучению при хранении труб на открытых площадках; уязвимость к микроповреждениям при транспортировке и укладке. Особенно остро проблема проявляется на стыковых

соединениях, где качество изоляции часто уступает заводскому покрытию [2]. Коррозия магистральных трубопроводов по своему механизму относится к электрохимическому виду, поскольку почвы и грунты в своём составе содержат влагу — почвенный или грунтовый электролит. Скорость коррозии металла в грунте зависит от его физических свойств: структуры, пористости, влажности, минерализации грунтовых вод, воздухопроницаемости, удельного электрического сопротивления и температуры среды [2, 4]. Удельное электрическое сопротивление грунта является комплексной характеристикой и зависит от множества факторов: влажности, содержания в грунте солей, температуры, структуры, гранулометрического состава. При прочих равных условиях органические грунты более пористы и менее плотные, чем минеральные, что объясняет их повышенную коррозионную активность [2]. Особенно опасная ситуация возникает, когда оголенный участок металлической поверхности соседствует с двумя разнородными почвами, что приводит к образованию гальванических пар дифференциальной аэрации и интенсификации коррозионного процесса [2, 4]. Кроме того, ужесточение нормативных требований к сроку службы трубопроводов и экологической безопасности материалов требует перехода к инновационным решениям. Таким образом, проблема заключается в необходимости разработки и внедрения новых поколений пассивных защитных систем, сочетающих повышенную коррозионную стойкость, механическую прочность, способность к самовосстановлению и совместимость с современными методами диагностики.

Целью научной работы является разработка научно обоснованного подхода к совершенствованию пассивной защиты магистральных газопроводов на основе комплексного анализа факторов, влияющих на коррозионное состояние трубопроводов, и интеграции инновационных материалов с системами прогнозирования технического состояния.

Анализ факторов, влияющих на эффективность пассивной защиты

Эффективность пассивной защиты газопроводов определяется комплексом факторов, связанных как с характеристиками грунтовой среды, так и с особенностями эксплуатации трубопроводной системы. Удельное электрическое сопротивление грунта является комплексной характеристикой и зависит от множества факторов: влажности, содержания в грунте солей, температуры, структуры, гранулометрического состава [2, 4]. При прочих равных условиях органические грунты более пористы (80–90%) и менее плотные (0,15–0,4 г/см³), чем минеральные (пористость 25–85%, плотность 0,9–1,8 г/см³), что объясняет их повышенную коррозионную активность [2]. После укладки трубопровода плотность грунта непосредственно рядом с трубой уменьшается, а пористость увеличивается по сравнению с ненарушенным грунтом, что повышает возможность проникания агрессивных компонентов к трубопроводу [4].

Гранулометрический состав грунтов оказывает существенное влияние на коррозионную агрессивность. Чем мельче частицы грунта, тем большую удельную поверхность они имеют и тем в большей степени способны удерживать влагу. Частицы размером 0,005 мм относятся к глинистым, которые очень хорошо удерживают влагу. Особенно опасная ситуация возникает при контакте оголенного участка металлической поверхности с двумя разнородными почвами (например, глина и песок), что приводит к образованию гальванических пар дифференциальной аэрации: через песок к поверхности металла легко подходит кислород и активизируется катодный процесс, влага легче поставляется глиной, в результате граница контакта превращается в активно функционирующий гальванический элемент [2, 4].

Влажность грунта оказывает двойственное влияние на коррозионные процессы. С одной стороны, естественный потенциал металла становится более отрицательным по мере повышения влажности грунта, поскольку грунт становится электролитом, обеспечивающим возможность протекания коррозии по электрохимическому механизму. С другой стороны, увеличение влажности грунта облегчает протекание анодного процесса и увеличивает электропроводность грунта, но затрудняет протекание катодного процесса из-за вытеснения кислорода из почвы. В песке при увеличении влажности с 0 до 20% скорость диффузии кислорода снижается в 10 000 раз. Скорость коррозии стали в глинистых почвах максимальна

при влажности 12–35%, а песков — 14–21%. При изменении влажности с 5% до критических значений скорость коррозии в глинах увеличивается примерно в 10 раз, а в песке — примерно в 3 раза [4]. Зависимость скорости коррозии от влажности имеет экстремальный характер, что связано с понижением аэрируемости почв по мере повышения их влажности.

Особую опасность представляет ситуация, обеспечивающая одновременный подвод к поверхности металла влаги и кислорода. При прочих равных условиях в хорошо аэрируемых грунтах скорость образования питтингов и язв падает с течением времени благодаря образованию на поверхности металла гидроксида железа с определёнными защитными свойствами. В плохо аэрируемых грунтах скорость коррозии снижается со временем медленно, поскольку образовавшиеся продукты коррозии диффундируют по почвенному электролиту вглубь почвы и не осаждаются на поверхности металла.

Инновационные материалы и технологии пассивной защиты

Современные инновации в пассивной защите газопроводов можно классифицировать по трём направлениям: материалы покрытий, технологии их нанесения и конструктивные решения многослойных систем.

Нанокompозитные покрытия. Наиболее значимым прорывом стало внедрение углеродных наноматериалов в полимерные матрицы. Графен-модифицированные эпоксидные покрытия (содержание графена 0,5–2 вес.%) создают молекулярный барьер толщиной менее 1 нм, блокирующий диффузию кислорода, влаги и агрессивных ионов. Исследования Национальной лаборатории энергетических технологий США (NETL, 2023) и Саратовского государственного технического университета (2024) подтвердили снижение скорости коррозии на 90–99% по сравнению с традиционными FBE-покрытиями [5–7]. Дополнительным преимуществом является повышение адгезии к стали на 40% и устойчивость к микробной коррозии. Углеродные нанотрубки (0,1–0,3 вес.%) в полиэтиленовых матрицах увеличивают механическую прочность на 25–30% и снижают деградацию под УФ-излучением на 40%, что критично для условий Сибири и Дальнего Востока [5]. Российские разработки термостойкостабилизированных композиций позволяют хранить изолированные трубы на открытых площадках до 6 месяцев без потери защитных свойств.

Самовосстанавливающиеся покрытия. Принципиально новым подходом стало создание «умных» покрытий с функцией автономного восстановления целостности. Микрокапсульные системы содержат в полимерной матрице капсулы диаметром 10–200 мкм с ингибиторами коррозии (церий-, молибденсодержащие соединения). При механическом повреждении капсулы разрушаются, высвобождая ингибитор, который формирует защитную плёнку на оголённом металле [5, 8]. Технология холодного напыления (cold spray) с эффектом самовосстановления, разработанная NETL в 2023 г., демонстрирует эффективность восстановления при повреждениях глубиной до 0,5 мм [5]. Вязкоэластичные покрытия на основе термоэластомеров (например, STORAQ, Нидерланды) способны к «закрытию» микротрещин за счёт памяти формы при температурных колебаниях грунта, что подтверждено промышленной эксплуатацией на европейских газопроводах с 2021 г. [8].

Усовершенствованные многослойные системы. Трёхслойные полипропиленовые покрытия (3LPP) вытесняют традиционные полиэтиленовые (3LPE) на ответственных участках. Замена наружного слоя с полиэтилена на полипропилен повышает верхний температурный предел эксплуатации с +80°C до +110°C, улучшает стойкость к УФ-излучению в 2,5 раза и сохраняет гибкость при температурах до –60°C [5, 9].

Инновации в технологиях нанесения. Ключевым фактором качества покрытия является подготовка поверхности. Лазерная очистка стали заменяет абразивную обработку, повышая адгезию на 15–20% и исключая риск вторичной коррозии при задержке нанесения покрытия [10]. Российская технология газопламенного напыления порошковых композиций (установка ANTICOR POLY, ООО «Антикор Полимер», 2021–2024 гг.) позволяет наносить покрытие толщиной 3–9 мм за один проход, сокращая время изоляции стыков на 40% по сравнению с ленточными системами.

Взаимосвязь пассивной защиты и коррозионного растрескивания под напряжением

Анализ аварийных ситуаций на газопроводах высокого давления показывает, что до 80% аварий, обусловленных коррозионным растрескиванием под напряжением (КРН), произошло на газопроводах со сроком службы более 10 лет. Большинство аварий (70% случаев) происходит вблизи компрессорных станций со стороны нагнетания (на расстоянии до 25 км), что связано с высокой температурой газа и вибрациями трубы [3, 11]. Наличие переменного уровня грунтовых вод в траншее под трубой способствует как КРН, так и электрохимической коррозии. В местах аварий, обусловленных КРН, потенциал поляризации в 2/3 случаев превышает 1 В по медно-сульфатному электроду сравнения, что характерно для первых километров от станций катодной защиты [3]. Однако наиболее опасны участки с нарушенной изоляцией в глинистых грунтах: при прокладке газопровода в тяжёлых почвах типа глин и суглинков вероятность КРН существенно возрастает из-за ограничения степеней свободы газопровода в траншеях с плотными стенками, что приводит к его изгибам преимущественно в вертикальном направлении при изменении режима работы трубопровода [3, 11].

Состояние изоляции в местах аварий чаще всего неудовлетворительное. Иногда защитная плёнка практически не нарушена, но всегда не исключаются гофры, карманы, отслоения изоляции. Именно в этом случае такие участки имеют плохую стресс-коррозионную защиту. Отслоившиеся покрытия действуют как барьер для защитного тока, в результате чего возникают разности потенциалов и, соответственно, инициируется процесс коррозионного растрескивания под напряжением, ускорить который могут следующие факторы:

- высокая коррозионная активность из-за наличия SO_2 или CO_2 , а также $\text{pH} = 6,5\div 10$ грунта, окружающего трубопровод;
- уровень кольцевых напряжений превышает предельно допустимое для данной стали значение [3, 11].

При этом коррозионное растрескивание под напряжением наблюдается преимущественно под зонами отслоения длиной более 25 см и длиной по окружности до 20 см. Вероятность как КРН, так и электрохимической коррозии существенным образом зависит от коррозионной активности почв. При кислых почвах ($\text{pH} < 5$) пассивирующая магнетитовая плёнка на поверхности трубы с нарушенной изоляцией либо отсутствует, либо рыхлая, что увеличивает вероятность электрохимической коррозии. При $\text{pH} > 6$ пассивирующая магнетитовая плёнка плотная (особенно в известковых почвах) и предохраняет трубопровод от электрохимической коррозии [3, 4].

Комплексный подход к совершенствованию пассивной защиты

На основе проведённого анализа предлагается комплексный подход к совершенствованию пассивной защиты, включающий следующие инновационные элементы:

1. Использование методики выбора системы пассивной защиты на основе вероятностно-статистического анализа факторов риска КРН. Такая методика позволяет количественно оценивать влияние 10 ключевых факторов на вероятность развития КРН и на основе этого выбирать оптимальную систему пассивной защиты. Критерии выбора включают: состояние изоляционного покрытия, время эксплуатации трубопровода, характеристики грунта (влажность, структура, гранулометрический состав), температуру транспортируемого газа, параметры электрохимической защиты, наличие блуждающих токов, металлургические и технологические факторы (химический состав труб, способ выплавки, способ производства трубного проката), характер и уровень напряжённо-деформированного состояния, материал защитного покрытия и его способ нанесения. Для каждого фактора определён весовой коэффициент влияния на вероятность КРН, что позволяет рассчитать интегральный показатель риска и выбрать соответствующую систему защиты (стандартная, усиленная или особо усиленная) [3, 11].

2. Интеграция пассивной защиты с системами непрерывного мониторинга целостности покрытия. Предлагается внедрение «умных» покрытий с встроенными оптоволоконными датчиками для непрерывного контроля целостности изоляции. Технология предусматривает размещение под покрытием оптоволоконных датчиков и микросенсоров для мониторинга:

потенциала коррозии, температуры, механических напряжений, целостности изоляционного покрытия, местоположения стыков труб, наличия блуждающих токов и пр. Данные передаются в реальном времени на центральный диспетчерский пункт, что позволяет оперативно выявлять участки с нарушением целостности покрытия и принимать превентивные меры до развития коррозионных дефектов [12].

3. Прогнозирование срока службы пассивной защиты на основе анализа аварийных ситуаций. Рекомендуется использование математической модели прогнозирования остаточного ресурса пассивной защиты, учитывающей: скорость деградации покрытия в зависимости от характеристик грунта, температуры стенки трубопровода, механических нагрузок; вероятность развития КРН в зависимости от состояния изоляции и параметров эксплуатации; динамику развития коррозионных дефектов на основе данных внутритрубной дефектоскопии. Модель позволяет рассчитать остаточный ресурс пассивной защиты с точностью $\pm 15\%$ и спланировать работы по переизоляции до возникновения аварийных ситуаций [3, 12].

4. Региональная адаптация систем пассивной защиты с учётом особенностей грунтов. Рекомендуется использовать классификацию грунтов по их влиянию на эффективность пассивной защиты и соответствующая адаптация систем защиты:

- для глинистых грунтов с высокой влажностью рекомендуется применение трёхслойных полипропиленовых покрытий (3LPP) с повышенной стойкостью к дисбондменту и температурной стабильностью;
- для песчаных грунтов с хорошей аэрацией целесообразно использование графен-модифицированных эпоксидных покрытий с повышенной адгезией и устойчивостью к механическим повреждениям;
- для районов с переменным уровнем грунтовых вод рекомендуется применение самовосстанавливающихся покрытий с микрокапсульными системами для автономного восстановления целостности при микроповреждениях;
- для участков вблизи компрессорных станций (до 25 км) с высокой температурой газа и вибрациями предложено использование комбинированных систем: многослойное покрытие + дополнительная защита стыков термоусаживающимися материалами с повышенной эластичностью [4, 5, 9].

Выводы

1. За период 2019–2025 гг. пассивная защита магистральных газопроводов претерпела качественный переход от традиционных покрытий к интеллектуальным композитным системам за счёт внедрения нанотехнологий (графен, углеродные нанотрубки), самовосстанавливающихся механизмов и усовершенствованных полимерных композиций.

2. Наибольший потенциал демонстрируют графен-модифицированные покрытия, обеспечивающие снижение скорости коррозии, и самовосстанавливающиеся системы, способные автономно устранять микроповреждения глубиной до 0,5 мм, что критично для повышения надёжности стыковых соединений.

3. Предложен комплексный подход к совершенствованию пассивной защиты, включающий: методику выбора системы защиты на основе вероятностно-статистического анализа факторов риска КРН; интеграцию пассивной защиты с системами непрерывного мониторинга целостности покрытия; прогнозирование срока службы пассивной защиты на основе анализа аварийных ситуаций; региональную адаптацию систем защиты с учётом особенностей грунтов.

4. Для дальнейшего совершенствования пассивной защиты необходимо: разработать стандартизированные методики испытаний самовосстанавливающихся покрытий; интегрировать пассивные покрытия с встроенными оптоволоконными датчиками для непрерывного мониторинга целостности; внедрить региональные адаптивные системы защиты с учётом особенностей грунтов и климатических условий.

5. Реализация предложенных инноваций позволит увеличить срок службы магистральных газопроводов до 80 лет и снизить количество коррозионных аварий на 40–50%,

что соответствует стратегическим задачам обеспечения энергетической безопасности Российской Федерации.

Список литературы

1. ГОСТ 9.923-2024. Единая система защиты от коррозии и старения. Системы коррозионного мониторинга. Классификация. М.: Российский институт стандартизации, 2024. – 6 с.
2. Куликова Е. С. Коррозия магистральных трубопроводов / Е. С. Куликова, С. С. Маскаленко // Форум молодых ученых. – Хабаровск, 2018. – Вып. 5-2 (21). С. 329-333.
3. Любчик А. Н. Прогнозирование технического состояния магистральных трубопроводов на основе анализа аварийных ситуаций / А. Н. Любчик, Е. И. Крапивский, О. М. Большунова // Записки Горного института. – 2011. – Т. 192. – С. 153–156.
4. Медведев М. Л. Коррозия и защита магистральных трубопроводов и резервуаров: учебное пособие для вызов нефтяного профиля / М. Л. Медведев, А. В. Мурадов, А.К. Прыгаев. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2013. – 250 с.
5. Клименко И. В. Возможности применения материалов на основе графена в нефтегазовой промышленности / И. В. Клименко // Булатовские чтения. – 2024. – № 2. – С. 65-67.
6. Aljibori H.S. Advances in corrosion protection coatings: A comprehensive review / H.S. Aljibori, A. Alamiery, A.A.H. Kadhum // Int. J. Corros. Scale Inhib. – 2023. Vol. 12 (4). – Pp. 1476-1520.
7. Хайдерсбах Р. Защита от коррозии и металловедение оборудования для добычи нефти и газа / Р. Хайдерсбах. – Санкт-Петербург, ЦОП «Профессия», 2015. – 480 с.
8. Алиев Д. Э. Применение самовосстанавливающихся материалов для защиты от коррозии морских трубопроводов / Д. Э. Алиев, Г. И. Иманова // Международный научный журнал «Вестник науки». – 2024. – № 3 (72) Том 1. – С. 459-467.
9. Низьев С. Г. О противокоррозионной защите магистральных и промысловых трубопроводов современными полимерными покрытиями / С. Г. Низьев // Территория Нефтегаз. – 2009. № 10. – С. 34-43.
10. Митрохин М. Ю. Плазменная очистка труб при ремонте магистральных трубопроводов / М. Ю. Митрохин, П. В. Крылов, Е. С. Сенокосов и др. // Газовая промышленность. – 2010. – № 7. – С. 46–49.
11. СТО Газпром 2-3.5-047-2006. Инструкция по расчету и проектированию электрохимической защиты от коррозии магистральных газопроводов. – М.: ОАО "Газпром", 2006. – 49 с.
12. Харионовский В.В. Научно-технические проблемы стресс-коррозии магистральных трубопроводов / В. В. Харионовский // Коррозия: материалы, защита. – 2011. – № 5. – С. 7-13.
13. Нефедов С.В., Запевалов Д.Н. Система оценки и прогноза коррозионного состояния магистральных газопроводов / С. В. Нефедов, Д. Н. Запевалов // Газовая промышленность. – 2008. – № 7 (620). – С. 69–73.

УДК 622.691.4

Лукин Вадим Вадимович,
магистрант гр. ТГВм-55а;
Чепурная Дарья Валентиновна,
магистрант гр. ЗТГВМ-55а;
Шацков Артем Олегович,
к.т.н., доцент каф. ТТГВ,
ДОННАСА-филиал НИУ МГСУ

РАЗРАБОТКА СХЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

Значительная часть территории страны (Сибирь, Дальний Восток, Крайний Север, удалённые районы) остаётся вне зоны действия магистральных газопроводов, и СПГ позволяет обеспечить надёжное и экономически оправданное газоснабжение этих регионов без строительства тысяч километров трубопроводов. Переход на малотоннажное производство и использование СПГ способствует повышению энергетической безопасности, диверсификации источников топлива и снижению зависимости от единой трубопроводной инфраструктуры, что особенно актуально в условиях геополитических рисков и необходимости быстрой адаптации к изменяющимся условиям. Статья посвящена актуальным аспектам проектирования и внедрения систем газоснабжения на основе сжиженного природного газа (СПГ) в условиях модернизации российской энергетической инфраструктуры.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, СПГ, схемы газоснабжения, малотоннажное производство, энергетическая инфраструктура, автономное газоснабжение, газификация регионов.

Газификация территорий России остается одной из приоритетных задач национальной энергетической политики. По данным Министерства энергетики РФ, уровень газификации страны на начало 2024 года составляет около 74,2%, однако существует значительная дифференциация между регионами: если в центральных областях этот показатель превышает 90%, то в отдаленных территориях Сибири и Дальнего Востока он не достигает и 30% [5].

Традиционное трубопроводное газоснабжение сталкивается с серьезными экономическими и технологическими ограничениями при газификации удаленных населенных пунктов с низкой плотностью населения. Строительство магистральных газопроводов в таких условиях требует капитальных затрат, которые могут достигать 15-25 миллионов рублей на километр трубопровода, что делает проекты экономически нецелесообразными [3]. Именно в этом контексте технологии сжиженного природного газа приобретают особую актуальность как альтернативный способ обеспечения населения и промышленности голубым топливом.

СПГ представляет собой природный газ, охлажденный до температуры минус 161-163°C, при которой он переходит в жидкое состояние. Этот процесс сопровождается уменьшением объема в 600 раз, что существенно упрощает транспортировку и хранение энергоносителя [7]. Современные технологии позволяют создавать как крупнотоннажные заводы по производству СПГ мощностью свыше 1 миллиона тонн в год, так и малотоннажные установки производительностью от 5 до 100 тысяч тонн ежегодно, которые могут размещаться непосредственно вблизи потребителей.

Федеральная программа развития газоснабжения и газификации регионов на период до 2030 года предусматривает активное использование технологий СПГ для обеспечения энергетической доступности в регионах, не охваченных единой газотранспортной системой.

По оценкам экспертов, потенциальный объем рынка СПГ для внутреннего потребления в России может достичь 8-10 миллионов тонн к 2030 году [1]. Это обусловлено не только географическими особенностями страны, но и экономической целесообразностью: для потребителей, удаленных от газовых магистралей более чем на 50-100 километров, использование СПГ становится более выгодным решением.

Следует отметить растущий интерес промышленных предприятий к технологиям СПГ как к способу обеспечения автономного энергоснабжения. Особенно это актуально для добывающих компаний, работающих в районах Крайнего Севера и приравненных к ним территориях, где создание стационарной газотранспортной инфраструктуры технически сложно или экономически нерентабельно [6]. Автономные СПГ-установки обеспечивают не только надежность энергоснабжения, но и снижение эксплуатационных затрат по сравнению с использованием дизельного топлива или мазута.

Разработка схем газоснабжения на базе сжиженного природного газа требует комплексного подхода, учитывающего специфику производства, хранения, транспортировки и регазификации СПГ. Технологическая цепочка включает несколько ключевых этапов, каждый из которых предъявляет особые требования к оборудованию и инфраструктуре [4]. Первым элементом системы является установка сжижения природного газа. Современные малотоннажные комплексы используют различные холодильные циклы:

- азотный детандерный цикл, обеспечивающий высокую энергоэффективность при производительности от 20 тонн СПГ в сутки;
- смешанный хладагентный цикл, оптимальный для установок средней мощности (50-100 тонн в сутки);
- каскадный цикл на чистых компонентах, применяемый в крупнотоннажных комплексах;
- цикл с детандером-компрессором, позволяющий снизить энергопотребление на 15-20% по сравнению с традиционными схемами.

Выбор технологии сжижения определяется множеством факторов, включая доступность источника газа, требуемую производительность, климатические условия и экономические параметры проекта. Согласно исследованиям, удельные капитальные затраты на создание малотоннажного завода СПГ составляют от 800 до 1500 долларов США за тонну годовой производительности, что существенно ниже, чем для крупнотоннажных проектов [2].

Критически важным компонентом инфраструктуры является система хранения СПГ. Криогенные резервуары должны обеспечивать минимальные потери продукта от испарения, которые в современных системах не превышают 0,05-0,1% в сутки. Применяются различные типы хранилищ:

- вертикальные цилиндрические резервуары с двойными стенками и вакуумной изоляцией для стационарных объектов;
- горизонтальные криогенные емкости для транспортных систем и промежуточных хранилищ;
- подземные резервуары для крупных газораспределительных станций в условиях ограниченной площади.

Транспортировка СПГ осуществляется специализированным автомобильным транспортом — криогенными цистернами объемом от 20 до 60 кубических метров. Развитие железнодорожных перевозок СПГ в специальных вагонах-цистернах открывает новые возможности для доставки больших объемов газа на расстояния до 2000-3000 километров [1]. Логистические схемы должны учитывать сезонность потребления, возможности создания буферных запасов и оптимизацию маршрутов доставки.

Завершающим этапом является регазификация — процесс перевода СПГ в газообразное состояние для подачи потребителям. Современные газораспределительные станции (ГРС) на базе СПГ оснащаются высокоэффективными испарителями различных типов:

- атмосферные испарители, использующие тепло окружающей среды (эффективны при температуре выше минус 10°C);

- испарители с промежуточным теплоносителем на базе водогликолевых растворов для работы в условиях низких температур;
- погружные испарители для малых установок производительностью до 500 кубических метров газа в час.

Особого внимания заслуживает вопрос автоматизации и цифровизации систем газоснабжения на базе СПГ. Современные комплексы оснащаются системами мониторинга и управления, обеспечивающими:

- непрерывный контроль технологических параметров (температуры, давления, уровня заполнения);
- автоматическое регулирование режимов регазификации в зависимости от потребления;
- дистанционную передачу данных и возможность удаленного управления;
- системы безопасности с многоуровневой защитой и аварийным отключением [4].

Интеграция СПГ-систем в существующую газораспределительную инфраструктуру требует тщательного проектирования узлов подключения, обеспечения совместимости параметров газа и соблюдения нормативных требований к качеству подаваемого потребителям топлива [7].

Развитие систем газоснабжения на базе СПГ в России опирается на развивающуюся нормативно-правовую базу. Основопологающим документом является Федеральный закон № 69-ФЗ «О газоснабжении в Российской Федерации», устанавливающий общие принципы функционирования газовой отрасли. Специфические требования к проектированию, строительству и эксплуатации объектов СПГ-инфраструктуры содержатся в своде правил СП 62.13330.2011 «Газораспределительные системы» и технических регламентах Таможенного союза [6].

В 2023-2024 годах произошла существенная актуализация нормативной базы, связанная с интенсификацией развития СПГ-проектов. Были разработаны и введены в действие дополнительные стандарты, регламентирующие:

- требования к безопасности малотоннажных установок сжижения природного газа;
- параметры качества СПГ для различных категорий потребителей;
- нормы проектирования криогенных хранилищ и систем транспортировки;
- правила подключения автономных СПГ-систем к распределительным сетям.

Важным аспектом является государственная поддержка проектов газификации с использованием технологий СПГ. В рамках программы субсидирования капитальных затрат предприятия могут получить компенсацию до 30-40% стоимости создания малотоннажных производств СПГ и газораспределительной инфраструктуры в удаленных регионах [3]. Это существенно улучшает экономические показатели проектов и сокращает сроки окупаемости инвестиций.

Экономическая эффективность внедрения СПГ-технологий определяется сравнением с альтернативными вариантами энергоснабжения. Для типового населенного пункта численностью 5000-10000 человек, удаленного от газовых магистралей на 80-150 километров, сравнительный анализ, приведенный в таблице 1, демонстрирует следующие показатели.

Данные показывают, что СПГ-решения обеспечивают оптимальный баланс между капитальными и операционными затратами, существенно превосходя по экономической эффективности использование жидкого топлива и в разы сокращая первоначальные инвестиции по сравнению со строительством газопроводов [2].

Таблица 1 – Сравнительный анализ экономической эффективности внедрения СПГ-технологий

Параметр	Трубопроводное газоснабжение	СПГ-система	Дизельное топливо
1	2	3	4
Капитальные затраты, млн руб.	850-1200	180-250	45-60
Срок реализации проекта, мес.	24-36	8-12	3-4
Эксплуатационные расходы, млн руб./год	12-18	25-35	65-85
Срок окупаемости, лет	8-12	5-7	—
Удельная стоимость энергии для потребителя, руб./кВт·ч	1,8-2,2	2,5-3,1	5,2-6,5

Данные показывают, что СПГ-решения обеспечивают оптимальный баланс между капитальными и операционными затратами, существенно превосходя по экономической эффективности использование жидкого топлива и в разы сокращая первоначальные инвестиции по сравнению со строительством газопроводов [2].

Критически важным фактором экономической целесообразности является расстояние от источника газа до конечного потребителя. Исследования показывают, что для расстояний свыше 100 километров и относительно небольших объемов потребления (до 10-15 миллионов кубометров газа в год) СПГ-технологии демонстрируют наилучшие экономические показатели [5]. При этом следует учитывать не только прямые финансовые параметры, но и социальные эффекты: улучшение экологической обстановки, повышение качества жизни населения, создание условий для развития промышленности в регионе.

Перспективным направлением является использование СПГ в качестве моторного топлива. Перевод автотранспорта и специальной техники на газомоторное топливо позволяет сократить эксплуатационные расходы на 30-40% при одновременном снижении вредных выбросов. Развитие сети автомобильных газонаполнительных компрессорных станций (АГНКС) на базе СПГ открывает новые возможности для комплексного использования газовой инфраструктуры [1].

Особое значение имеет учет экологических аспектов. Замещение угля и мазута природным газом в промышленных котельных и теплоэлектростанциях обеспечивает сокращение выбросов углекислого газа на 40-50%, практически полное устранение выбросов оксидов серы и значительное снижение концентрации оксидов азота [4]. В условиях ужесточения экологических требований и введения системы квотирования выбросов парниковых газов это создает дополнительные экономические стимулы для перехода на газовое топливо.

Развитие технологий сжиженного природного газа в России находится на траектории интенсивного роста. Согласно прогнозам отраслевых экспертов, к 2030 году объем внутреннего рынка СПГ может достичь 10-12 миллионов тонн ежегодно, что потребует создания разветвленной инфраструктуры производства, хранения и распределения [2]. Ключевыми драйверами этого процесса выступают программы газификации регионов, развитие газомоторного транспорта и потребности промышленности в автономном энергоснабжении.

Инновационные технологические решения открывают новые возможности для повышения эффективности СПГ-систем:

- мобильные малотоннажные установки контейнерного типа производительностью 5-20 тонн СПГ в сутки, которые могут оперативно развертываться в местах временного потребления (вахтовые поселки, строительные площадки);

- интегрированные энергетические комплексы, совмещающие производство СПГ с выработкой электроэнергии и использованием холода процесса сжижения для нужд промышленности;

– системы утилизации попутного нефтяного газа на месторождениях с получением товарного СПГ для местного потребления;

– цифровые платформы управления логистикой СПГ, оптимизирующие маршруты доставки и обеспечивающие эффективное использование транспортного флота [7].

Особый потенциал связан с развитием распределенной энергетики на базе СПГ. Небольшие газопоршневые и газотурбинные установки, работающие на регазифицированном СПГ, способны обеспечить автономное энергоснабжение отдаленных объектов с высокой степенью надежности. Коэффициент использования топлива в когенерационных установках достигает 85-90%, что существенно превышает показатели традиционной раздельной выработки тепла и электроэнергии [3].

Интеграция СПГ-технологий с возобновляемыми источниками энергии представляет собой перспективное направление развития гибридных энергосистем. В условиях непостоянной генерации ветровых и солнечных электростанций СПГ-установки могут выполнять функцию резервного источника, обеспечивая стабильность энергоснабжения. Такие схемы особенно актуальны для изолированных энергосистем северных территорий [6]. Развитие нормативной базы движется в направлении гармонизации российских стандартов с международными требованиями при сохранении учета национальной специфики. Разрабатываются упрощенные процедуры согласования проектов малотоннажных СПГ-производств, что должно ускорить реализацию инвестиционных программ. Совершенствование системы технического регулирования направлено на обеспечение безопасности при одновременном снижении административных барьеров [4].

Подготовка кадров для СПГ-отрасли становится приоритетной задачей. Ведущие технические университеты страны открывают специализированные образовательные программы, включающие изучение криогенных технологий, проектирования СПГ-систем и эксплуатации газораспределительного оборудования. Развивается система профессиональных стандартов и программ повышения квалификации для специалистов отрасли [1].

Международное сотрудничество в области СПГ-технологий приобретает новые формы. Несмотря на геополитические вызовы, продолжается обмен опытом с ведущими технологическими компаниями в части локализации производства оборудования и трансфера технологий. Импортозамещение критических компонентов СПГ-установок становится стратегической задачей, решение которой обеспечит технологическую независимость отрасли [5].

Список литературы

1. Лазник, А.А., Гордеева, Т. С. Проблемы российского рынка сжиженного природного газа в условиях санкционного давления и пути их решения // Вестник ГУУ. - 2024. - №8. – С. 63-68.
2. Баранов, А.Ю., Соколова, Е.В., Иванов, Л.В., Иконникова, А.Ю. Перспективы развития технологий СПГ в Российской Федерации. Вестник Международной академии холода. – 2023. - № 1. – С. 23-34.
3. Артихович, В. В. Сжиженные углеводородные газы : учебно-методическое пособие по дисциплине "Газоснабжение" для студентов специальности 1-70 04 02 "Теплогазоснабжение, вентиляция и охрана воздушного бассейна" / В. В. Артихович, М. Г. Пшоник ; Белорусский национальный технический университет, Кафедра "Теплогазоснабжение и вентиляция". – Минск : БНТУ, 2010. – 219 с.
4. Савельева Н. К., Созинова А. А., Макарова М. В. Перспективы развития газовой промышленности в Российской Федерации в новых экономических условиях // Вестник СурГУ. - 2024. - №4. – 104-111.
5. Вишняков, В. И. Мировой рынок сжиженного природного газа: конъюнктура и современные тенденции развития // МНИЖ. 2022. - №5-4 (119). – С. 142-150.

6. Рябчик, А.П., Шаркова, А.В. Малая энергетика - драйвер развития России // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. – 2023. – № 2 (140). – С. 41-46.

7. Архаров А.М., Семенов, В.Ю., Лихачева, Н.И. Исследование эффективных малотоннажных установок сжижения природного газа // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2017. – №4 (64). – С. 1-11.

УДК 696.2

Баканов Андрей Владимирович
магистрант гр. ТГВм-55а;
Коваленко Денис Владиславович
магистрант гр. ЗТГВМ-55а;
Шацков Артем Олегович,
к.т.н., доцент каф. ТТГВ,
ДОННАСА-филиал НИУ МГСУ

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ МАЛЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

Тема разработки эффективных систем газоснабжения малых населённых пунктов крайне важна для современной России по нескольким стратегическим причинам. Во-первых, значительная часть страны — особенно сельские районы, Сибирь, Дальний Восток и удалённые регионы — до сих пор имеет низкий уровень газификации (в ряде субъектов ниже 10–20%), где люди вынуждены отапливаться углём, дровами или дорогим привозным топливом, что приводит к высокой стоимости жизни и серьёзному загрязнению воздуха. Во-вторых, газификация напрямую повышает качество жизни населения: переход на природный газ снижает затраты на отопление и приготовление пищи в 2–4 раза, улучшает комфорт в домах и способствует удержанию людей в малых населённых пунктах, замедляя процесс их вымирания и депопуляции. В-третьих, это ключевое направление социальной политики государства — программы «Газпрома» на 2026–2030 годы предусматривают подключение сотен тысяч домовладений именно в сельской местности и малых посёлках, с целью приближения к 100% технически возможной газификации к 2030–2036 годам, что объявлено приоритетом на уровне Президента и Правительства.

Ключевые слова: газоснабжение, малые населенные пункты, газораспределительные сети, сжиженный природный газ, энергетическая инфраструктура, газификация, техноэкономическая эффективность.

Проблема обеспечения доступа к природному газу для жителей малых населенных пунктов остается одной из ключевых в контексте повышения качества жизни сельского населения и развития региональной инфраструктуры. По данным Федеральной службы государственной статистики, по состоянию на начало 2025 года уровень газификации в России составляет в среднем 74,2%, однако в сельской местности этот показатель существенно ниже — около 63,8% [4]. Значительная часть малых населенных пунктов, особенно в отдаленных регионах, до сих пор не имеет доступа к централизованному газоснабжению.

Проблема газификации малых поселений приобретает особую актуальность в свете стратегических задач пространственного развития Российской Федерации. Отсутствие современных систем энергоснабжения создает существенные барьеры для социально-экономического развития территорий, способствует миграционному оттоку населения и консервирует технологическую отсталость сельского хозяйства [7]. В условиях, когда Россия обладает крупнейшими в мире запасами природного газа, неравномерность доступа к этому ресурсу представляет собой не только экономическую, но и социальную проблему.

Особую сложность представляет экономическая составляющая вопроса. Строительство газораспределительных сетей в малонаселенных пунктах требует значительных капиталовложений при относительно небольшом объеме потребления газа. Согласно исследованиям, удельные затраты на подключение одного домохозяйства в населенном пункте с численностью менее 500 человек могут превышать среднероссийские показатели в 3–5 раз [2]. Это создает экономические барьеры как для газораспределительных организаций, так и для потенциальных потребителей.

Климатические условия большей части территории России с продолжительным отопительным сезоном делают вопрос доступности эффективных энергоносителей критически важным для обеспечения комфортных условий проживания. Использование твердого топлива и электроэнергии для отопления в удаленных населенных пунктах оказывается существенно дороже и менее экологично по сравнению с природным газом. Переход на газовое отопление позволяет снизить расходы домохозяйств на энергоснабжение в среднем на 35-45% и значительно улучшить экологическую обстановку [5].

Современная практика газификации малых населенных пунктов предполагает использование различных технологических решений в зависимости от географических, демографических и экономических факторов. Традиционная модель подключения к магистральным газопроводам через строительство распределительных сетей оправдана для поселений, расположенных в радиусе до 50-70 километров от существующей газотранспортной инфраструктуры и имеющих достаточную плотность потребления [3].

Для удаленных населенных пунктов все большую актуальность приобретают альтернативные технологии:

- автономные системы газоснабжения на базе резервуаров со сжиженным углеводородным газом (СУГ);
- использование сжиженного природного газа (СПГ) с созданием локальных регазификационных установок;
- модульные газогенераторные станции малой мощности;
- комбинированные системы с использованием возобновляемых источников энергии.

Особый интерес представляет технология использования СПГ, которая активно развивается в России в последние годы. Создание региональных центров по производству и распределению СПГ позволяет обеспечивать газом удаленные территории без строительства дорогостоящих трубопроводных систем. Автомобильная доставка СПГ в специализированных криогенных емкостях с последующей регазификацией на месте потребления оказывается экономически оправданной для населенных пунктов с численностью от 100 до 2000 человек, расположенных на расстоянии более 80 километров от газотранспортной системы [6].

Важным направлением повышения эффективности систем газоснабжения является применение цифровых технологий и систем интеллектуального управления. Современные системы мониторинга и диспетчеризации позволяют оптимизировать режимы работы газораспределительного оборудования, своевременно выявлять утечки и аварийные ситуации, прогнозировать потребление и планировать техническое обслуживание. Внедрение «умных» систем учета газа обеспечивает прозрачность расчетов и стимулирует рациональное потребление энергоресурсов [1].

Техническое проектирование систем газоснабжения малых населенных пунктов требует учета специфических факторов:

- географической разбросанности объектов потребления;
- сезонной неравномерности газопотребления;
- ограниченных возможностей оперативного технического обслуживания;
- необходимости обеспечения высокого уровня автономности и надежности.

Решение этих задач достигается через применение модульных конструкций оборудования, использование материалов и технологий, обеспечивающих длительный межремонтный период, создание систем резервирования критически важных элементов. Современные газорегуляторные пункты и распределительные сети для малых поселений проектируются с расчетом на минимизацию эксплуатационных расходов и возможность дистанционного управления [2].

Ключевым фактором, определяющим возможность реализации проектов газификации малых населенных пунктов, является разработка эффективных экономических моделей и механизмов финансирования. Высокая капиталоемкость инфраструктурных проектов при

ограниченном числе потребителей создает объективные сложности для обеспечения приемлемой рентабельности инвестиций.

Существующая практика финансирования газификации в России основывается на модели совместного участия государства, газораспределительных организаций и потребителей. Государственная программа газификации регионов предусматривает софинансирование строительства межпоселковых газопроводов из федерального бюджета и бюджетов субъектов Федерации. Доля государственного участия может достигать 70-90% от общего объема инвестиций в зависимости от социально-экономического положения региона [4].

Важным элементом экономической модели является определение оптимального баланса между единовременными капитальными затратами на строительство сетевой инфраструктуры и текущими операционными расходами на эксплуатацию автономных систем. Для населенных пунктов с численностью менее 200-300 человек применение автономных систем на базе СУГ или СПГ зачастую оказывается более эффективным с точки зрения совокупной стоимости владения в долгосрочной перспективе [7].

Расчет экономической эффективности различных вариантов газоснабжения должен учитывать множество факторов:

- капитальные затраты на строительство инфраструктуры;
- операционные расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание;
- стоимость энергоносителя для конечного потребителя;
- затраты на резервирование и обеспечение надежности поставок;
- социальные эффекты и косвенные выгоды для развития территории.

Перспективным направлением является развитие механизмов государственно-частного партнерства в сфере газификации малых населенных пунктов. Привлечение частных инвестиций в инфраструктурные проекты возможно при условии предоставления государственных гарантий возвратности инвестиций и обеспечения долгосрочной стабильности тарифного регулирования. Концессионные соглашения и соглашения о защите и поощрении капиталовложений позволяют распределить риски между государством и частным инвестором [3].

Важным инструментом повышения доступности газификации для населения являются программы льготного кредитования и субсидирования подключения к газовым сетям. Многие регионы внедряют механизмы компенсации части расходов граждан на технологическое присоединение к газораспределительным сетям, что особенно актуально для домохозяйств с низким уровнем доходов. Социальная направленность таких программ способствует повышению темпов газификации и улучшению жилищных условий сельского населения [5].

Территориальная протяженность России и разнообразие природно-климатических условий требуют дифференцированного подхода к выбору технологий газоснабжения малых населенных пунктов. Регионы Севера и Дальнего Востока характеризуются экстремальными климатическими условиями, значительной удаленностью населенных пунктов друг от друга и высокой стоимостью транспортировки материалов и оборудования. В таких условиях приоритетными становятся максимально автономные системы с минимальными требованиями к техническому обслуживанию [6].

Для регионов Центральной России и Поволжья, обладающих развитой газотранспортной инфраструктурой, более эффективным оказывается расширение сетевого газоснабжения с подключением малых поселений к существующим распределительным сетям. Относительно высокая плотность населения и компактное расположение населенных пунктов обеспечивают приемлемые удельные показатели капитальных затрат [1].

Особого внимания заслуживает опыт газификации малых населенных пунктов в регионах Сибири, где сочетаются значительные запасы природного газа с низкой плотностью населения и суровыми климатическими условиями. Здесь активно внедряются гибридные схемы газоснабжения, предусматривающие комбинированное использование сетевого газа,

СПГ и локальных источников энергии. Такой подход обеспечивает необходимую надежность энергоснабжения при оптимизации затрат [2].

Перспективным направлением является развитие малотоннажного производства СПГ в газодобывающих регионах с созданием региональных хабов по распределению сжиженного газа. Это позволяет монетизировать попутный нефтяной газ и газ удаленных месторождений, одновременно обеспечивая доступным энергоносителем население отдаленных территорий. Организация логистических цепочек доставки СПГ автомобильным транспортом открывает возможности газификации практически любых населенных пунктов независимо от их удаленности от магистральных газопроводов [7].

Важным аспектом региональной адаптации технологических решений является учет местных традиций и особенностей застройки населенных пунктов. В регионах с исторически сложившейся разреженной застройкой целесообразно развитие индивидуальных систем газоснабжения на базе газгольдеров или мини-резервуаров СПГ для каждого домохозяйства. В поселениях с компактной планировкой более эффективными оказываются централизованные системы с общепоселковым газохранилищем и распределительной сетью низкого давления [3].

Развитие систем газоснабжения малых населенных пунктов в среднесрочной перспективе будет определяться несколькими ключевыми тенденциями. Во-первых, прогнозирование требуемого расхода газа в зависимости от места застройки — все это позволит существенно повысить эффективность систем газоснабжения [5]. В таблицах 1, 2 и 3 указано расчётное газопотребления существующими жилыми зданиями усадебного типа.

Таблица 1 – Расчетное газопотребление существующими жилыми зданиями усадебного типа (газовое оборудование квартир — газовые плиты и газовые отопительные печи периодического действия)

Расчетное газопотребление	Климатическая зона эксплуатации здания		
	Умеренно- теплая (Краснодар)	Умеренно- холодная (Саратов)	Холодная (Екатеринбург)
1	2	3	4
Максимальный часовой расход газа отопительными печами, м ³ /ч	5,46	6,12	6,75
Максимальный часовой расход газа газовой плитой, м ³ /ч	1,2	1,2	1,2
Максимальный часовой расход газа квартирой, м ³ /ч	6,66	7,32	7,95
Годовой расход газа отопительными печами, м ³ /ч	1196	2134	2394
Годовой расход газа газовой плитой, м ³ /ч	739	739	739
Годовой расход газа квартирой, м ³ /ч	1935	2873	3133

Таблица 2 – Расчетное газопотребление энергосберегающими жилыми зданиями усадебного типа (газовое оборудование квартир — газовые плиты и газовые отопительные котлы)

Расчетное газопотребление	Климатическая зона эксплуатации здания		
	Умеренно-теплая (Краснодар)	Умеренно-холодная (Саратов)	Холодная (Екатеринбург)
1	2	3	4
Максимальный часовой расход газа отопительными печами, м ³ /ч	0,57	0,64	0,75
Максимальный часовой расход газа газовой плитой, м ³ /ч	1,2	1,2	1,2
Максимальный часовой расход газа квартирой, м ³ /ч	1,77	1,84	1,95
Годовой расход газа отопительными печами, м ³ /ч	608	1185	1407
Годовой расход газа газовой плитой, м ³ /ч	739	739	739
Годовой расход газа квартирой, м ³ /ч	1347	1924	2146

Таблица 3 – Расчетное газопотребление энергосберегающими жилыми зданиями коттеджного типа (газовое оборудование квартир — газовые плиты, газовые котлы двухцелевого назначения (отопление и горячее водоснабжение))

Расчетное газопотребление	Климатическая зона эксплуатации здания		
	Умеренно-теплая (Краснодар)	Умеренно-холодная (Саратов)	Холодная (Екатеринбург)
1	2	3	4
Максимальный часовой расход газа отопительными печами, м ³ /ч	2,9	2,9	2,9
Максимальный часовой расход газа газовой плитой, м ³ /ч	1,2	1,2	1,2
Максимальный часовой расход газа квартирой, м ³ /ч	2,87	2,87	2,87
Годовой расход газа отопительными печами, м ³ /ч	1392	2030	2273
Годовой расход газа газовой плитой, м ³ /ч	282	282	282
Годовой расход газа квартирой, м ³ /ч	1674	2312	2555

Во-вторых, развитие отечественного производства оборудования для малотоннажной газификации. Импортозамещение в сегменте компактных регазификационных установок, автоматизированных газорегуляторных пунктов и систем телеметрии критически важно для обеспечения технологической независимости и снижения стоимости оборудования. Создание конкурентной среды среди российских производителей будет способствовать повышению качества и доступности оборудования [4].

В-третьих, интеграция систем газоснабжения с другими элементами энергетической инфраструктуры в концепции «умных» энергосистем. Координация работы газовых, электрических и тепловых сетей на основе единых цифровых платформ управления позволит оптимизировать энергопотребление, повысить надежность снабжения и создать условия для внедрения распределенной генерации [1].

Особое значение приобретает развитие нормативно-правовой базы, регулирующей различные аспекты газификации малых населенных пунктов:

- совершенствование механизмов тарифного регулирования с учетом специфики удаленных территорий;
- упрощение процедур согласования и получения разрешительной документации;
- стандартизация технических требований к оборудованию и системам автономного газоснабжения;
- развитие механизмов стимулирования инвестиций в газификацию малых поселений.

Экологические аспекты газификации сельских территорий также выходят на первый план. Переход с угля и дров на природный газ обеспечивает существенное сокращение выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов. Это вносит вклад в достижение национальных климатических целей и улучшает качество окружающей среды в сельской местности [6].

Социальный эффект от газификации малых населенных пунктов выражается не только в повышении комфорта проживания, но и в создании предпосылок для развития малого предпринимательства, возрождения сельскохозяйственного производства, развития придорожного сервиса и туристической инфраструктуры. Доступность современных энергоносителей делает сельские территории более привлекательными для проживания и ведения бизнеса, что способствует закреплению населения и привлечению новых жителей [7].

Разработка эффективных систем газоснабжения малых населенных пунктов представляет собой комплексную задачу, требующую интеграции технологических, экономических, организационных и социальных решений. Анализ современного состояния и перспектив развития газификации сельских территорий России позволяет сформулировать ряд ключевых выводов.

Технологическое разнообразие решений, от традиционного сетевого газоснабжения до инновационных систем на базе СПГ и автономных газгольдерных установок, создает возможности для газификации практически любых населенных пунктов с учетом их специфических условий. Выбор оптимального варианта должен основываться на всестороннем технико-экономическом анализе с учетом не только прямых затрат, но и долгосрочных социальных и экологических эффектов.

Экономическая эффективность проектов газификации малых поселений в значительной степени зависит от механизмов государственной поддержки и оптимизации организационных моделей реализации. Развитие государственно-частного партнерства, совершенствование тарифного регулирования и применение дифференцированных подходов к финансированию в зависимости от социально-экономического положения регионов являются необходимыми условиями ускорения темпов газификации.

Список литературы

1. Романова Т. Н., Белоглазова Т. Н. Эффективность газоснабжения на основе цифровой трансформации // Строительство и техногенная безопасность. – 2024. – №32 (84). – С. 63-72.
2. Чепурной, М.К., Легошина, Д.Д., Лысова, Е.П. Повышение энергоэффективности систем газоснабжения в условиях низкой плотности потребителей // Вестник науки. – 2025. – №5 (86). – С. 2154-2162.
3. Бачин Е.А. Государственно-частное партнерство в России: проблемы и пути их решения // Ученые заметки ТОГУ. – 2024. – №2. – С. 176-182.
4. Программа газификации России ПАО «Газпром» 2026–2030. URL: <https://www.gazprommap.ru/program/>
5. Кирпичев В. В. Газификация как фактор устойчивого развития сельских территорий // Экономический анализ: теория и практика. - 2018. - №6 (477). – С. 1034-1050.

6. Архаров А.М., Семенов, В.Ю., Лихачева, Н.И. Исследование эффективных малотоннажных установок сжижения природного газа // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2017. – №4 (64). – С. 1-11.

7. ПАО «Газпром». Газификация и догазификация регионов, 2024. URL: <https://sustainability.gazpromreport.ru/2024/regional-social-and-economic-development/initial-and-further-gas-infrastructure-expansion/>

УДК 697.9:534.83

Солоницын Павел Алексеевич,
магистрант гр. ЗТГВм-55а;
Усиченко Александр Владимирович,
магистрант гр. ЗТГВм-55а;
Максимова Наталья Анатольевна,
к.т.н., доцент, доцент каф. ТТГВ,
ДОННАСА – филиал НИУ МГСУ

СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ШУМОГЛУШЕНИЯ В СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦИИ

В статье рассмотрена проблема шумогенерации в системах вентиляции и кондиционирования воздуха как ключевой фактор снижения комфортности и безопасности эксплуатации зданий. Проведен анализ источников шума: аэродинамического, механического и вибрационного. Основное внимание уделено современным методам пассивного и активного шумоглушения, включающим применение усовершенствованных конструкций шумоглушителей, использование высокоэффективных звукопоглощающих материалов с микро- и наноструктурой, а также комплексные виброизоляционные решения. Освещены принципы активного подавления шума на основе цифровой обработки сигнала. Приведены практические рекомендации по выбору методов шумоглушения на этапе проектирования и монтажа систем вентиляции в соответствии с актуальными нормативными требованиями.

Ключевые слова: вентиляция, шумоглушение, акустический комфорт, шумоглушитель, звукопоглощение, виброизоляция, активное подавление шума.

Современные системы вентиляции и кондиционирования являются неотъемлемой частью зданий любого назначения. Однако их работа неизбежно сопровождается генерацией шума, превышение допустимых уровней которого ведет к дискомфорту, повышенной утомляемости людей, снижению производительности труда и, в конечном счете, к ухудшению состояния здоровья. В связи с ужесточением санитарно-гигиенических и строительных норм по акустике (СП 51.13330.2011 [1], эквивалент Еврокоду EN 12354-5), задача эффективного шумоглушения становится критически важной на всех этапах: проектирования, монтажа и эксплуатации систем вентиляции. [1,2]

Целью данной статьи является систематизация и анализ современных, наиболее эффективных методов и технических решений для снижения шума в системах вентиляции.

Для выбора корректного метода шумоглушения необходимо идентифицировать природу и источник шума:

1. Аэродинамический шум: генерируется турбулентными потоками воздуха при его движении через элементы системы: вентиляторы, воздуховоды (особенно в местах сужений, поворотов, ответвлений), решетки, диффузоры, дроссель-клапаны. Характеризуется широким частотным спектром и является доминирующим в большинстве систем.

2. Механический шум: возникает от вибрации вращающихся и движущихся частей оборудования (лопастей и ротора вентилятора, подшипников, приводов). Имеет дискретные тональные составляющие.

3. Вибрационный (структурный) шум: передается от работающего оборудования (вентиляционных агрегатов, насосов, компрессоров) через опоры, крепления и строительные конструкции на значительные расстояния, вызывая вторичное излучение звука.

Современные методы и средства пассивного шумоглушения

Пассивные методы, основанные на поглощении и отражении звуковой энергии без

использования внешних источников питания, остаются основой акустического проектирования. [3]

Усовершенствованные конструкции шумоглушителей:

Пластинчатые шумоглушители: современные модели имеют оптимизированный профиль пластин, покрытых высокоэффективным звукопоглощающим материалом (минераловатными матами на основе базальтового волокна с покрытием из стеклохолста). Применяются в воздуховодах большого сечения. Тренд — разработка кассетных конструкций для легкого монтажа и обслуживания.

Трубчатые (круглые) шумоглушители: активно используются во фланцевых соединениях. Современные решения предусматривают внутреннюю перфорированную облицовку из многослойных композитных материалов, обеспечивающих поглощение в широком диапазоне частот. Разрабатываются гибкие трубчатые глушители для соединения виброизолированных участков.

Камерные (полостные) шумоглушители: применяются для подавления низкочастотного шума. Современный подход включает создание лабиринтных структур и камер Гельмгольца, рассчитанных с помощью компьютерного моделирования (CFD и акустического анализа) под конкретную спектральную характеристику шума.

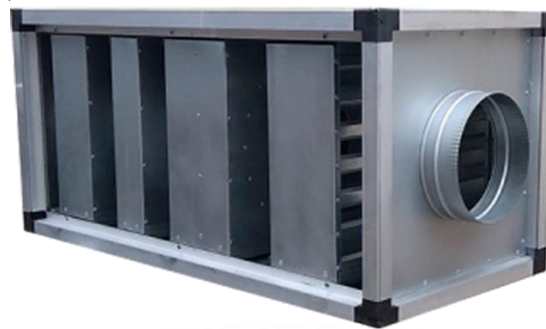
а)



б)



в)



а) трубчатый б) пластинчатый в) камерный

Рисунок 1 – Типы шумоглушителей

Перспективные звукопоглощающие материалы:

На смену традиционному стекловолокну и минеральной вате приходят материалы с улучшенными экологическими и акустическими характеристиками:

- минераловатные плиты на основе базальта с повышенной плотностью и гидрофобной пропиткой;
- вспененные полимеры с открытой ячеистой структурой (меламиновые пены, полиуретаны), обладающие высоким коэффициентом звукопоглощения, особенно на средних и высоких частотах;
- гибридные и многослойные материалы, сочетающие слой пористого поглотителя и

мембрану для эффективного подавления низкочастотных составляющих;

– наноструктурированные материалы и акустические метаматериалы, позволяющие контролировать распространение звука на принципиально новом уровне (в стадии активных исследований и начала коммерческого применения).

Комплексная виброизоляция:

– применение виброизолирующих оснований и пружинных или резинометаллических виброопор под вентиляционные агрегаты;

– обязательное использование гибких вставок (из армированной резины или ткани) на присоединении воздухопроводов к вентиляторам и другим источникам вибрации;

– плавающие полы в венткамерах.

Активные системы шумоглушения (Active Noise Control - ANC)

Это динамический метод, основанный на принципе суперпозиции волн: электронная система генерирует «антишум» — звуковой сигнал, идентичный исходному шуму в противофазе, что приводит к их взаимному гашению. [4,5]

Особенно эффективно для подавления низкочастотного тонального шума (например, от вентилятора или компрессора), где пассивные методы громоздки.

Микрофон-анализатор улавливает шум, процессор в реальном времени формирует противофазный сигнал, который излучается через динамик, установленный в воздуховоде. Современные цифровые сигнальные процессоры (DSP) позволяют эффективно работать с изменяющимися режимами работы системы.

Преимуществом данного метода является компактность, высокая эффективность на низких частотах. Недостатками является высокая стоимость, сложность настройки, эффективность ограничена зоной действия системы.

Интегральный подход к проектированию

Современный тренд — комплексное акустическое проектирование систем вентиляции с самого начала:

1. Выбор мал шумного оборудования: вентиляторов с аэродинамически оптимизированными лопастями и ЕС-двигателями.

2. Акустический расчет: моделирование распространения шума по системе с помощью специализированного программного обеспечения (например, SoundPLAN, CadnaA) для определения требуемой эффективности шумоглушителей.

3. Оптимизация трассировки воздухопроводов: сведение к минимуму поворотов, ответвлений, изменений сечения. Плавные радиусы вместо колен.

4. Грамотная облицовка и изоляция: применение звукопоглощающих конструкций (кожухов, капотов) для оборудования и облицовки стен венткамер.

5. Строгое соблюдение правил монтажа: надежное крепление воздухопроводов, герметизация соединений, правильная установка гибких вставок и шумоглушителей.

Заключение

Задача обеспечения акустического комфорта в помещениях, обслуживаемых системами вентиляции, требует системного подхода. Наиболее эффективной стратегией является интеграция современных методов пассивного шумоглушения, основанных на последних достижениях в материаловедении и конструкторских решениях, с элементами активного подавления для целевого воздействия на низкочастотные тональные составляющие. Ключевым фактором успеха является проведение детальных акустических расчетов на этапе проектирования и неукоснительное соблюдение технологий монтажа. Дальнейшее развитие отрасли связано с внедрением «интеллектуальных» систем адаптивного шумоглушения и более широким применением акустических метаматериалов, позволяющих создать компактные и сверхэффективные глушители нового поколения.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 14163-2009. Руководство по применению глушителей шума. – Введ. 2011-01-01. – Москва : Стандартиформ, 2010. – 28 с.
2. СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003. – Введ. 2011-05-20. – Москва : Минрегионразвития России, 2011. – 110 с.
3. Внутренние санитарно-технические устройства: Справочник проектировщика / Под ред. И. Г. Старовойтова. — Москва : Стройиздат, 1978. — 509 с.
4. Капралов, В. А. Акустика вентиляционных систем / В. А. Капралов, Ю. И. Шиллер. – Москва : АСВ, 2015. – 248 с.
5. Тихонов, А. И. Глушители шума вентиляционных установок: теория и расчет / А. И. Тихонов. – Санкт-Петербург : НИИХ СПбГУ, 2018. – 180 с.

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1. ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Редкий Артемий Владимирович, Ивашенко Екатерина Александровна, Максимова Наталья Анатольевна. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ТЕПЛО- И ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ	3
Удовиченко Злата Викторовна, Дереха Екатерина Сергеевна, Сергиенко Наталья Николаевна. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОГАЗА В СИСТЕМАХ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ МАЛЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ.....	7
Удовиченко Злата Викторовна, Огнев Никита Сергеевич, Кныш Никита Сергеевич. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПУНКТОВ ПО СРАВНЕНИЮ С ЦЕНТРАЛЬНЫМИ ДЛЯ УСЛОВИЙ ДОНБАССА	12
Прудникова Яна Валентиновна, Полковников Алексей Андреевич. ПРИМЕНЕНИЕ В ПУНКТАХ РЕДУЦИРОВАНИЯ ГАЗА ОБОРУДОВАНИЯ С УВЕЛИЧЕННЫМИ СРОКАМИ МЕЖДУ ТЕХНИЧЕСКИМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ И ТЕКУЩИМ РЕМОНТОМ.....	16
Шацков Артем Олегович, Лисконог Михаил Иванович. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ.....	19
Грешной Евгений Алексеевич, Шам Сергей Сергеевич, Шацков Артем Олегович. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМ ГАЗОВОГО ИНФРАКРАСНОГО ОБОГРЕВА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ	24
Леонтьев Александр Александрович, Попов Константин Дмитриевич, Шацков Артем Олегович. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЗА СЧЕТ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА ..	28
Соленая Маргарита Дмитриевна, Рожков Игорь Николаевич, Родыгина Мария Михайловна. ОРГАНИЗАЦИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ ПЕРВЫХ МАССОВЫХ СЕРИЙ.....	33
Таран Вера Михайловна, Макаровская Лариса Васильевна, Гусенцова Яна Алимовна. ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТЬ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ.....	36
Толстенко Владислав Витальевич, Щербак Виктор Николаевич, Красногрудов Александр Васильевич. СПОСОБ РАСЧЕТА СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛООБМЕНА	43
Монах Светлана Игоревна, Гогохия Игорь Гиевич, Жукова Елена Андреевна. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА БИТУМОПЛАВИЛЬНОГО АГРЕГАТА ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА ГАЗООБРАЗНОМ ТОПЛИВЕ.....	48

Монах Светлана Игоревна, Гогохия Игорь Гиевич, Жукова Елена Андреевна. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНОЙ ЦЕНТРАЛИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ С МНОГОРЯДНОЙ ЗАСТРОЙКОЙ СЕЛИТЕБНОЙ ТЕРРИТОРИИ	55
Монах Светлана Игоревна, Орлова Алла Яковлевна, Воробьева Ирина Валериевна. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА В НЕОДНОРОДНОЙ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ РЕБРАМИ.....	64
Монах Светлана Игоревна, Орлова Алла Яковлевна, Воробьева Ирина Валериевна. ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЙ ОДНОРОДНОСТИ ДЛЯ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ С ТЕПЛОПРОВОДНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ	69
Монах Светлана Игоревна, Красникова Виктория Владимировна. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕЛИОГРУНТОВОЙ ТЕПЛОСНАБЖАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ С АККУМУЛИРОВАНИЕМ ТЕПЛОТЫ.....	76
Монах Светлана Игоревна, Красникова Виктория Владимировна. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ГРУНТОВОМ АККУМУЛЯТОРЕ ТЕПЛОТЫ.....	81
Монах Светлана Игоревна, Шацков Роман Олегович, Рель Юлия Константиновна. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО КОМФОРТА И РАБОТЫ СИСТЕМ РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНОГО ОТОПЛЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ БОЛЬШОГО ОБЪЕМА.....	89
Монах Светлана Игоревна, Рязанцева Людмила Александровна, Рель Юлия Константиновна. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ПОМЕЩЕНИЙ С СИСТЕМАМИ ОТОПЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГАЗОВЫХ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ.....	102
Монах Светлана Игоревна, Рязанцев Александр Владимирович, Симуров Дмитрий Александрович. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ УДЕЛЬНОГО ТЕПЛОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ОТОПЛЕНИЕ ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ.....	108
Монах Светлана Игоревна, Степанчак Алексей Васильевич, Симуров Дмитрий Александрович. ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛОТЫ В ПОЛУОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ	115
Монах Светлана Игоревна, Сулейманов Андрей Энверович, Степанчак Алексей Васильевич. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ НА НАРУЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ ТЕМПЕРАТУР НАРУЖНОГО И ВНУТРЕННЕГО ВОЗДУХА	124
Золотухина Наталья Викторовна, Раецкий Петр Тимофеевич. РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ МОДИФИКАЦИИ БЕТОНА НА ОСНОВЕ КАРБОНАТНЫХ МИКРОНАПОЛНИТЕЛЕЙ.....	131

Золотухина Наталья Викторовна, Дудник Анна Вячеславовна. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЖИЛОГО ДОМА НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ 138

Золотухина Наталья Викторовна, Гордиенко Ксения Евгеньевна. КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБЪЕКТА В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ТРЕБОВАНИЙ УСТОЙЧИВОГО СТРОИТЕЛЬСТВА 146

Яркин Юрий Александрович, Самойлова Елена Эдуардовна. ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНАЯ ПЕРЕРАБОТКА НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ПРИРОДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ..... 160

Радцев Александр Яковлевич, Самойлова Елена Эдуардовна. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПУТЁМ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ОТХОДОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ И БИОУДОБРЕНИЙ 164

Красильников Алексей Валерьевич, Шацков Артем Олегович. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОТЛОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИХ КОНСТРУКЦИИ..... 168

Пинчук Никита Александрович, Борисов Дмитрий Геннадьевич, Долгов Николай Викторович. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНУТРЕДОМОВЫХ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ ЗА СЧЕТ АВТОМАТИЗАЦИИ 173

Захаров Станислав Викторович, Ступакова Ольга Александровна, Долгов Николай Викторович. ПРИМЕНЕНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА ДЛЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ 177

Савич Дарья Владимировна, Аланин Андрей Анатольевич. РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ И МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ 181

Савич Дарья Владимировна, Кубрин Алексей Николаевич, Старцев Богдан Русланович. РАЗРАБОТКА УПРАВЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ..... 185

СЕКЦИЯ 2. ИНЖЕНЕРНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА ГОРОДОВ

Зайченко Людмила Геннадьевна, Куценко Татьяна Николаевна, Донцов Максим Игоревич. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ БЕСТРАНШЕЙНОЙ ПРОКЛАДКИ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ВОДОПРОВОДНОЙ СЕТИ..... 189

Зайченко Людмила Геннадьевна, Витязь Елена Николаевна, Царенкова Полина Александровна. НЕУЧТЕННЫЕ РАСХОДЫ В СИСТЕМАХ КОММУНАЛЬНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ 194

Зайченко Людмила Геннадьевна, Акулова Юлия Геннадьевна, Половнева Марина Александровна. УТИЛИЗАЦИЯ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД КАНАЛИЗАЦИОННЫХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ 198

Левыкин Ринат Романович, Следчук Иван Викторович, Григоренко Надежда Ивановна. РАЗРАБОТКА МЕТОДИК КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПОСТУПАЮЩИХ СТОЧНЫХ ВОД..... 203

Синежук Инна Борисовна, Дубнянский Александр Васильевич, Косенко Владислав Валериевич. О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЗОВСКОГО МОРЯ В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА ПИТЬЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ..... 211

Ручка Владислав Владиславович, Лупеева Татьяна Игоревна, Сюзяев Александр Сергеевич. ИССЛЕДОВАНИЕ БАКТЕРИЦИДНОГО ДЕЙСТВИЯ АЗОТНОЙ КИСЛОТЫ НА БГКП В ИЛОВОЙ ВОДЕ ИЗБЫТОЧНОГО АКТИВНОГО ИЛА..... 216

Могучало Анастасия Вадимовна, Платонов Андрей Игоревич, Лазаревич Елена Владимировна. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ИЗБЫТОЧНОГО АКТИВНОГО ИЛА МЕТОДОМ ФЕНТОНА 220

Могучало Анастасия Вадимовна, Спивак Артем Геннадиевич, Рошин Сергей Константинович. ХАРАКТЕРИСТИКА, ОБРАЗОВАНИЕ И ПУТИ УТИЛИЗАЦИИ ОСАДКОВ ГОРОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД..... 225

Нездойминов Виктор Иванович, Саламбаш Игорь Вадимович, Ефанов Вячеслав Александрович. ВЕРМИТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ОСАДКОВ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ..... 230

Хапчук Федор Николаевич, Гришаев Виталий Владимирович, Комиссаренко Ангела Алексеевна. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ВОДОСНАБЖЕНИИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ 235

Бут Виталий Сергеевич, Дьяконенко Виталий Владимирович, Шацков Артем Олегович. МЕТОДЫ ЭФФЕКТИВНОГО РАЗВИТИЯ И РЕКОНСТРУКЦИИ СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ 240

СЕКЦИЯ 4. НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ ТГВ И БЕЗОПАСНОСТИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Шеховцов Павел Васильевич, Цикал Игорь Николаевич, Максимова Наталья Анатольевна. ПРОТИВОДЫМНАЯ ВЕНТИЛЯЦИЯ АВТОСТОЯНОК ЗАКРЫТОГО ТИПА 245

Удовиченко Злата Викторовна, Шага Александр Александрович, Самерин Виталий Павлович. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ 248

Удовиченко Злата Викторовна, Полякова Юлия Николаевна, Сомова Светлана Дмитриевна. ВЛИЯНИЕ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫХ И ТОПОГРАФИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СХЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ 254

Головач Юлия Александровна, Дудниченко Данил Александрович, Коваленко Сергей Александрович. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПАССИВНОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ	260
Лукин Вадим Вадимович, Чепурная Дарья Валентиновна, Шацков Артем Олегович. РАЗРАБОТКА СХЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА	266
Баканов Андрей Владимирович, Коваленко Денис Владиславович, Шацков Артем Олегович. РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ МАЛЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ	272
СЕКЦИЯ 5. ИННОВАЦИИ В ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЯХ: ОТОПЛЕНИЯ, ГАЗОСНАБЖЕНИЯ, ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА	
Солоницын Павел Алексеевич, Усиченко Александр Владимирович, Максимова Наталья Анатольевна. СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ШУМОГЛУШЕНИЯ В СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦИИ.....	279
СОДЕРЖАНИЕ.....	283

Научное электронное издание
**«ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ИНЖЕНЕРНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
СИСТЕМАХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ»**

*Электронный сборник статей по материалам VII открытой международной
очно-заочной научно-практической конференции молодых ученых и студентов*

(20 февраля 2026 г., Макеевка)

Ответственный за издание: *А. В. Лукьянов*
e-mail: ttgv@donnasa.ru,
d.v.savich@donnasa.ru

Компьютерная вёрстка: *Д.В. Савич, Б.В.Кляус*