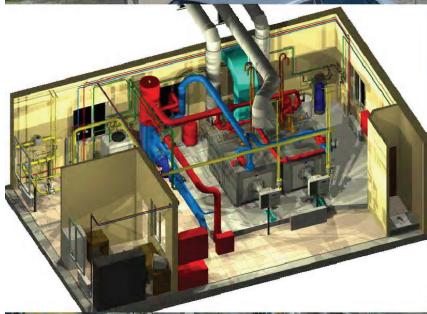


# ВЕСТНИК

ДОНБАССКОЙ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ



**Выпуск 2022-5(157)**

**ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ  
И ТЕХНОГЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

ГОУ ВПО “Донбасская национальная академия  
строительства и архитектуры”

**ВЕСТНИК**  
**Донбасской национальной академии**  
**строительства и архитектуры**

Издается с декабря 1995 года  
Выходит не менее 6 раз в год

**Выпуск 2022-5(157)**

**ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ  
И ТЕХНОГЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

Макеевка 2022

ДОУ ВПО "Донбаська національна академія  
будівництва і архітектури"

# **ВІСНИК**

**Донбаської національної академії  
будівництва і архітектури**

Видається з грудня 1995 року  
Виходить не менш 6 разів на рік

**Випуск 2022-5(157)**

**ІНЖЕНЕРНІ СИСТЕМИ  
ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА**

Макіївка 2022

## **Основатель и издатель**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»  
Свидетельство о регистрации средства массовой информации серия ААА № 000094  
выдано 17.01.2017 г. Министерством информации ДНР

Авторы опубликованных материалов несут ответственность за достоверность приведенных сведений, точность данных по цитируемой литературе и за использование в статьях данных, не подлежащих открытой публикации.

В случае использования материалов ссылка на «Вестник ДонНАСА» является обязательной.

Выпускается по решению ученого совета  
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»  
Протокол № 3 от 31.10.2022 г.

### **Редакционный совет:**

Горохов Е. В., д. т. н., профессор – главный редактор;  
Мущанов В. Ф., д. т. н., профессор – зам. гл. редактора (научный редактор);  
Югов А. М., д. т. н., профессор – технический редактор;  
Лукьянов А. В., д. т. н., профессор – ответственный редактор выпуска.

### **Редакционная коллегия:**

Андрийчук Н. Д., д. т. н., профессор;	Насонкина Н. Г., д. т. н., профессор;
Башевая Т. С., к. т. н., доцент;	Нездойминов В. И., д. т. н., профессор;
Горохов Е. В., д. т. н., профессор;	Олексюк А. А., д. т. н., профессор;
Лукьянов А. В., д. т. н., профессор;	Рожков В. С., к. т. н., доцент;
Мущанов В. Ф., д. т. н., профессор;	Сердюк А. И., д. т. н., профессор;
Найманов А. Я., д. т. н., профессор;	Удовиченко З. В., к. т. н., доцент;
	Югов А. М., д. т. н., профессор

Корректоры Л. М. Лещенко  
Программное обеспечение С. В. Гавенко  
Компьютерная верстка Е. А. Солодкова

Подписано к выпуску 21.11.2022

### **Адрес редакции и издателя**

86123, ДНР, г. Макеевка, ул. Державина, 2,  
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»  
Телефоны: +38(062) 343-7033; +38(062) 343-7028  
E-mail: [vestnik@donnasa.ru](mailto:vestnik@donnasa.ru), <http://vestnik.donnasa.ru>

Приказом МОН ДНР № 464 от 02.05.2017 г. журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Выпущено в полиграфическом центре  
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»  
86123, ДНР, г. Макеевка, ул. Державина, 2

© ГОУ ВПО «Донбасская национальная  
академия строительства и архитектуры», 2022

**Засновник і видавець**

ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»  
Свідоцтво про реєстрацію засобу масової інформації серія ААА № 000094  
видано 17.01.2017 р. Міністерством інформації ДНР

Автори надрукованих матеріалів несуть відповідальність за вірогідність наведених відомостей, точність даних за цитованою літературою і за використання в статтях даних, що не підлягають відкритій публікації.

У випадку використання матеріалів посилання на «Вісник ДонНАБА» є обов'язковим.

Випускається за рішенням Вченої ради  
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»  
Протокол № 3 від 31.10.2022 р.

**Редакційна рада:**

Горохов Є. В., д. т. н., професор – головний редактор;  
Мущанов В. П., д. т. н., професор – заст. гол. редактора (науковий редактор);  
Югов А. М., д. т. н., професор – технічний редактор;  
Лук'янов О. В., д. т. н., професор – відповідальний редактор випуску.

**Редакційна колегія:**

Андрійчук М. Д., д. т. н., професор;	Насонкина Н. Г., д. т. н., професор;
Башева Т. С., к. т. н., доцент;	Нездоймінов В. І., д. т. н., професор;
Горохов Є. В., д. т. н., професор;	Олексюк А. О., д. т. н., професор;
Лук'янов О. В., д. т. н., професор;	Рожков В. С., к. т. н., доцент;
Мущанов В. П., д. т. н., професор;	Сердюк О. І., д. т. н., професор;
Найманов А. Я., д. т. н., професор;	Удовиченко З. В., к. т. н., доцент;
	Югов А. М., д. т. н., професор

Коректори Л. М. Лещенко  
Програмне забезпечення С. В. Гавенко  
Комп'ютерне верстання Е. А. Солодкова

Підписано до випуску 21.11.2022

**Адреса редакції і видавця**

86123, ДНР, м. Макіївка, вул. Державіна, 2,  
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»  
+38(062) 343-7033; +38(062) 343-7028  
E-mail: vestnik@donnasa.ru, <http://vestnik.donnasa.ru>

Наказом МОН ДНР № 464 від 02.05.2017 р. журнал включено до переліку рецензованих наукових видань, в яких повинні бути опубліковані основні наукові результати дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата наук, на здобуття наукового ступеня доктора наук

Випущено у поліграфічному центрі  
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»  
86123, ДНР, м. Макіївка, вул. Державіна, 2

© ДОУ ВПО «Донбаська національна  
академія будівництва і архітектури», 2022

EDN: BDYWXR

УДК 697

**В. Н. АНДРИЙЧУК, В. И. СОКОЛОВ, Н. Д. АНДРИЙЧУК**

Институт строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства Луганского государственного университета имени Владимира Даля

## **УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМАМИ ОТОПЛЕНИЯ, ВЕНТИЛЯЦИИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МРС-ПОДХОДА**

**Аннотация.** В работе рассмотрен вопрос апробации МРС-подхода для управления системами отопления, вентиляции и кондиционирования, а также обоснована возможность совершенствования процесса регулирования его применением на примере вентиляционной системы. Изложен принцип управления с использованием прогнозирующей модели, отмечены особенности управления с использованием МРС-регулятора, рассмотрена структура регулятора и критерий выбора оптимальных значений управляющего сигнала. Показана реализация МРС-подхода на примере приточной вентиляционной системы VAV учебной аудитории. Для моделирования вентиляционной системы в среде Simulink пакета прикладных программ MATLAB разработана блок-диаграмма, для синтеза МРС-регулятора использован набор программных инструментов Model Predictive Control Toolbox. Проведено исследование переходных процессов в вентиляционной системе VAV, сопоставлены переходные процессы в системе без регулятора с ПИД-регулятором и МРС-регулятором. Сравнение результатов показало, что использование МРС-регулятора позволяет совершенствовать процесс регулирования теплового режима в помещении за счет повышения качества регулирования.

**Ключевые слова:** микроклимат, МРС-регулятор, вентиляционная система VAV, температура, переходной процесс

### **ВВЕДЕНИЕ**

Системы отопления, вентиляции и кондиционирования (ОВК), также HVAC (акроним от английского Heating, Ventilation and Air Conditioning), являются одной из наиболее важных составляющих проектирования и разработки промышленных и административных зданий и жилых помещений [1–3]. Системы ОВК с помощью подачи наружного воздуха поддерживают в них безопасные и комфортные условия по температуре, влажности, скорости движения воздуха и чистоте воздушной среды.

### **АКТУАЛЬНОСТЬ ЗАДАЧИ**

Основными задачами управления системами ОВК (или HVAC) являются [3–5]:

- создание и поддержание микроклимата в пределах здания, сооружения или помещения, комфорtnого для человека или животных и растений, а также материальных предметов (оборудования, веществ, изделий, произведений искусства и т. п.);
- энергосбережение или экономия энергии, затрачиваемой на создание и поддержание микроклимата;
- технологическая безопасность системы и снижение затрат на ее эксплуатацию.

Затраты на системы ОВК составляют значительную часть затрат на эксплуатацию здания и во многом определяются правильным построением автоматизированных систем управления микроклиматом. При анализе совокупных затрат в ряде случаев получается, что покупная стоимость составляет иногда очень небольшую часть, часто около 10 %. Остальные 90 % идут на эксплуатационные затраты.

Для эффективного управления системами ОВК необходимо вести оперативный контроль параметров микроклимата и состояния параметров исполнительных механизмов, а также формировать

© В. Н. Андрийчук, В. И. Соколов, Н. Д. Андрийчук, 2022



разные режимы работы оборудования [3, 5, 6]. Так, в системах вентиляции следует выбирать режим работы в соответствии с внешними и внутренними факторами (температура и влажность воздуха, загруженность помещений, концентрация вредных веществ). Чаще всего такое задание возникает в переходной период, когда диапазон изменения температуры варьируется в больших границах. Автоматизация и диспетчеризация требуют достижения определенных условий: комфортность, энергосбережение, технологическая безопасность, снижение затрат на эксплуатацию.

В этой связи актуальной задачей является совершенствование процессов регулирования систем ОВК.

### АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

В настоящее время появились новые тенденции в построении систем автоматического управления [7, 8], которые дают возможности совершенствования процессов управления инженерным оборудованием зданий и помещений. И здесь следует отметить активно обсуждаемый подход для управления различными технологическими процессами, использующий прогнозирующие модели – Model Predictive Control (MPC) [9, 10].

Идея MPC-подхода к адаптивному управлению с обратной связью состоит в том, чтобы найти последовательность оптимальных управляющих воздействий, которая обеспечит наилучшее прогнозируемое состояние объекта управления на ограниченном горизонте прогнозирования [9, 11]. Задача синтеза адаптивного управления нелинейными объектами на основе данного подхода состоит из трех основных шагов. Сначала дифференциальные уравнения нелинейного объекта представляются приближенными линеаризованными системами на каждом интервале управления. Далее с использованием линеаризованных моделей строятся прогнозирующие модели по выходным сигналам объекта управления на определенное количество шагов вперед. И на последнем этапе на основе прогнозирующих моделей минимизируется функционала качества по алгоритму квадратичного программирования для определения оптимального управляющего воздействия на систему.

MPC-подход хорошо зарекомендовал себя в различных областях управления нелинейными объектами, в том числе при решении задач управления тепловым режимом зданий [12]. К основным преимуществам MPC-подхода необходимо отнести то, что оптимальный регулятор, синтез которого проведен согласно данному подходу, обеспечивает отсутствие статической ошибки в системе, выполнение требуемых ограничений на управляющие и выходные переменные, а также достижение компромисса между работоспособностью и качеством регулирования [9, 10]. Вместе с тем, как и большинство других оптимальных систем, он требует наличия модели объекта управления. Поскольку MPC-подход реализует закон управления с обратной связью по состоянию, а управление рассматривается и выполняется на очень коротком временном промежутке, то важным его достоинством является то, что для синтеза системы управления можно использовать приближенные линейные модели.

В этой связи несомненный интерес вызывает апробация MPC-подхода для управления системами ОВК, его реализация на конкретном примере и сопоставление качества регулирования с традиционными подходами, в частности, с использованием ПИД-регуляторов.

**Целью работы** является апробация MPC-подхода для управления системами ОВК и обоснование возможности совершенствование процесса регулирования его применением на примере вентиляционной системы.

### МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для наглядности реализации MPC-подхода рассмотрим систему ОВК как одномерную систему, т. е. рассматриваем ее как объект управления (ОУ) с одной выходной величиной  $y$ . Также считаем, что система автоматического управления (САУ) воспринимает одно задающее воздействие  $g$  и одно возмущающее воздействие  $f$ . Тогда САУ с MPC-регулятором можно представить структурной схемой, показанной на рис. 1.

На рис. 1 обозначены:  $g$  – задающее воздействие (уставка);  $f$  – возмущающее воздействие (возмущение);  $u$  – управляющее воздействие (сигнал управления);  $W_u$  – передаточная функция ОУ по сигналу управления;  $W_f$  – передаточная функция ОУ по возмущению;  $y$  – выходная (регулируемая) величина (переменная);  $\epsilon$  – ошибка управления,  $\epsilon = g - y$ .

На рис. 2 показана структурная схема MPC-регулятора. В состав регулятора входит прогнозирующая модель ОУ и оптимизатор.

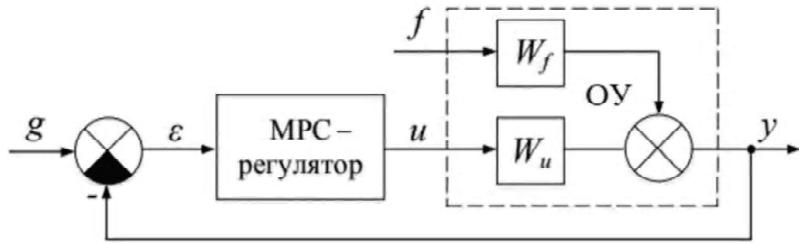


Рисунок 1 – Структурная схема САУ с MPC-регулятором.

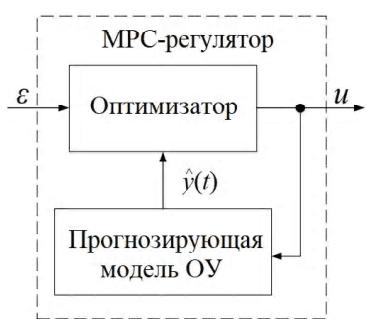


Рисунок 2 – Структурная схема MPC-регулятора.

Основная идея управления с прогнозирующей моделью заключается в следующем. Пусть имеются вход объекта по управлению  $u(t)$  и выходная регулируемая переменная  $y(t)$ . Задающее воздействие  $g(t)$  является желаемой величиной (зависимостью) изменения регулируемой переменной. Систему рассматриваем в дискретные моменты времени, т. е. только в моменты времени  $t = k\Delta T$ , где  $\Delta T$  – период квантования, а  $k$  – целое число.

Главной особенностью управления с помощью MPC-регулятора является наличие математической модели ОУ, которая достаточно точно описывает его поведение. Наличие адекватной математической модели ОУ позволяет прогнозировать значения регулируемой переменной на определенное число шагов вперед (рис. 3).

На рис. 3 значения регулируемой величины  $y(t)$ , предсказанные в момент времени  $t$ , обозначены через  $\hat{y}(t)$ . Горизонт предсказания стро-

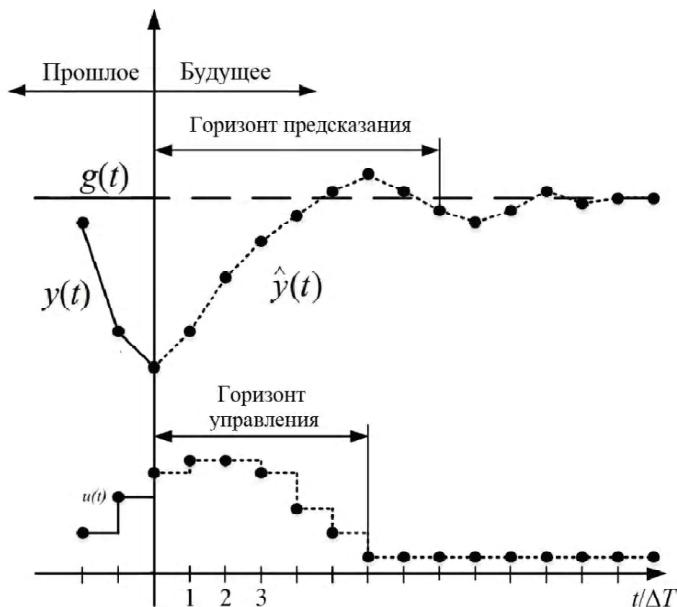


Рисунок 3 – Принцип управления на основе MPC-подхода.

ится на определенное число шагов  $n_p$ . Прогнозируемая траектория регулируемой переменной будет зависеть от будущих значений управляющего воздействия  $u(t)$ . Суть MPC-подхода состоит в определении последовательности значений управляющего сигнала  $u(t)$ , которая позволит обеспечить наилучшую прогнозируемую траекторию для регулируемой переменной  $y(t)$ . Длина последовательности  $n_c$  рассчитываемых управляющих воздействий  $u(t)$  является фиксированной величиной и называется горизонтом управления. Необходимая последовательность значений управляющего воздействия устанавливается решением задачи оптимизации. Выбор наилучшей траектории регулируемой переменной определяется показателем качества регулирования, которым принимают квадрат рассогласования между прогнозируемой выходной переменной  $y(t)$  и задающим воздействием (желаемой

траекторией)  $g(t)$ . Также оценивается изменение величины управляющего сигнала. Таким образом, для выбора оптимальных значений сигнала управления  $u(t)$  MPC-регулятор стремится минимизировать следующий функционал

$$J = Q \sum_{i=k}^{k+n_p} (y(i) - g(i))^2 + R \sum_{i=k}^{k+n_c} (u(i) - u(k))^2, \quad (1)$$

где  $Q$  и  $R$  – весовые коэффициенты (для безразмерных переменных обычно принимают одинаковыми);

$k = 1, 2, 3 \dots$  – целое число, соответствующее текущему моменту времени;

$n_p$  – число шагов, на которые строится прогноз поведения регулируемой переменной  $y(t)$  (горизонт предсказания);

$n_c$  – длина последовательности будущих значений управляющего сигнала  $u(t)$  (горизонт управления).

После подачи на ОУ вычисленного оптимального управляющего воздействия  $u(t)$  на следующем шаге вся процедура повторяется заново с учетом вновь поступившей информации.

Для реализации MPC-подхода в пакете прикладных программ MATLAB имеется набор программных инструментов Model Predictive Control Toolbox для проектирования и моделирования MPC-регуляторов [11].

Покажем реализацию MPC-подхода для управления системами ОВК на примере приточной вентиляционной системы VAV (от английского названия «Variable Air Volume» – переменный объем воздуха) [13–14] учебной аудитории (рис. 4) в осенне-весенний период, которая поддерживает заданный температурный режим  $T(t)$  в помещении путем изменения объема подаваемого нагретого воздуха.

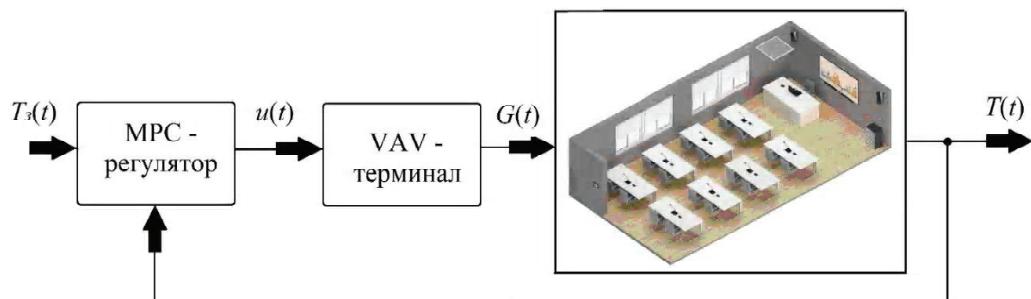
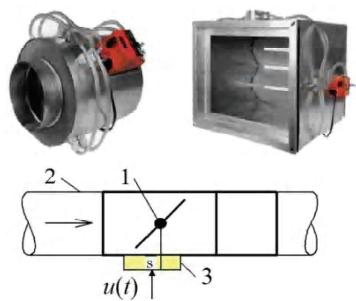


Рисунок 4 – Схема вентиляционной системы VAV.

В рассматриваемой вентиляционной системе VAV изменение тепловой нагрузки помещения компенсируется изменением количества приточного воздуха  $G(t)$ , поступающего от центральной приточной вентиляционной установки при его постоянной температуре. Вентиляционная система VAV работает при общем значении расхода воздуха меньшем, чем необходимо при суммарной максимальной тепловой нагрузке. Это обеспечивает снижение потребляемой энергии при сохранении заданного качества воздуха внутри помещения. Вентиляционная система VAV может быть полностью интегрирована с комплексной системой управления зданием BAS (Building Automation System), что обеспечивает пользователю здания возможность мониторинга и управления параметрами работы всей системы ОВК.

Основным элементом вентиляционной системы VAV является терминал VAV (регулятор или клапан VAV) [13–14], схема которого представлена на рис. 5. Основной задачей терминала VAV является поддержание расхода воздуха в зависимости от необходимой потребности, величина которого определяется управляющим сигналом  $u(t)$ . Поддержание необходимого значения расхода обеспечивается положением дроссельной заслонки 1. Заданному значению расхода соответствует перепад давлений на дифференциальном манометре, установленном в воздуховоде 2. При отклонении перепада давлений от заданного значения электропривод изменяет положение дроссельной заслонки, тем самым поддерживая требуемое значение расхода.



**Рисунок 5 – Терминалы VAV для воздушных каналов круглого и прямоугольного сечения: 1 – дроссельная заслонка; 2 – воздуховод; 3 – электропривод дроссельной заслонки.**

Исследование вентиляционной системы VAV проводим по задающему воздействию – заданной температуре в помещении  $T_g(t)$ . Предварительно известными методами [7, 8] на основе экспериментальных исследований выполнена параметрическая идентификация вентиляционной системы как ОУ температурой воздуха в помещении  $T(t)$  по поступающему в него массовому расходу нагретого воздуха  $G(t)$ . Для идентификации математической модели использованы возможности блока программных инструментов System Identification Toolbox пакета прикладных программ MATLAB. Получена следующая передаточная функция для температуры в помещении по массовому расходу воздуха для безразмерных переменных

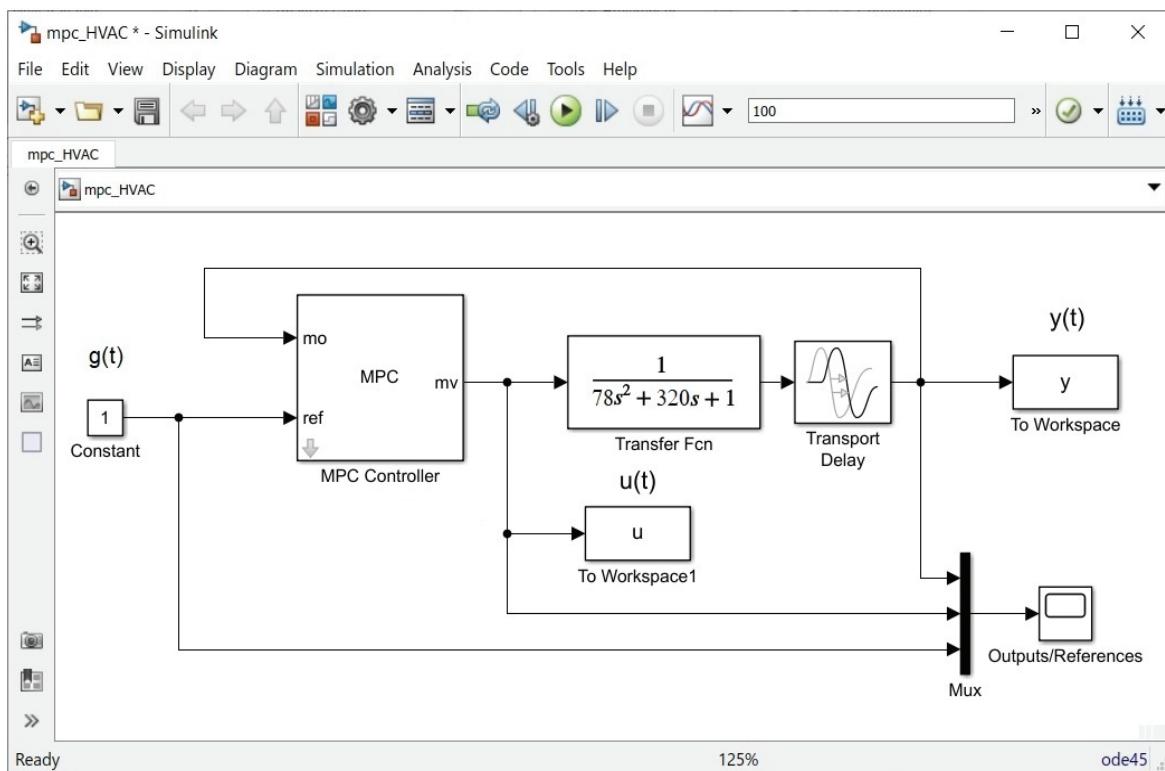
$$W_{TG}(s) = \frac{e^{-54s}}{78s^2 + 320s + 1}, \quad (2)$$

где  $s$  – переменная Лапласа.

Передаточная функция (2) представляет собой произведение двух типовых звеньев: апериодического звена 2-го порядка и звена запаздывания со временем  $\tau = 54$  с. Передаточная функция (2) составлена для безразмерных отклонений переменных.

Для моделирования вентиляционной системы VAV в среде Simulink пакета прикладных программ MATLAB разработана блок-диаграмма, представленная на рис. 6. Для синтеза MPC-регулятора использован набор программных инструментов Model Predictive Control Toolbox. Для этого предварительно в командной строке MATLAB была задана передаточная функция ОУ:

`>>plant=tf(1,[78 320 1],'IODelay',54).`



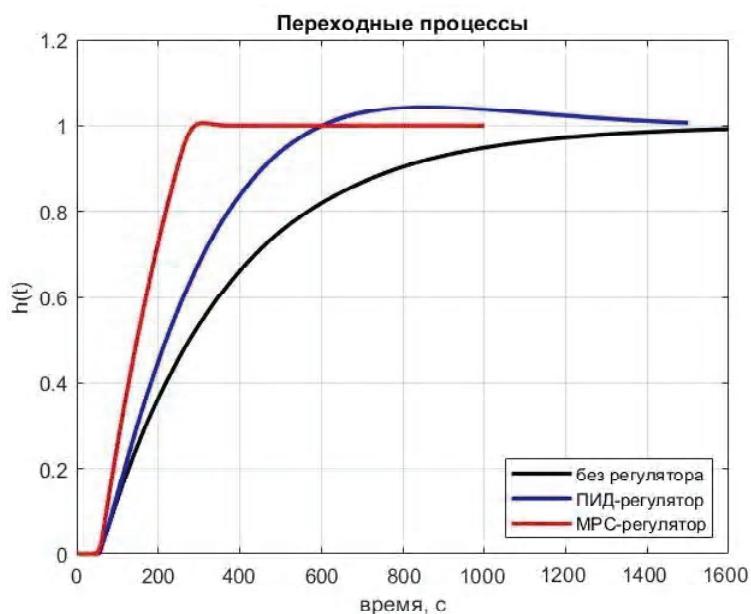
**Рисунок 6 – Блок-диаграмма системы в среде Simulink.**

Далее следующими командами соответственно спроектирован MPC-регулятор и заданы его ограничения

`>>mpcobj=mpc(plant, 10, 100, 30);  
>>mpcobj.MV=struct('Min',0,'Max',2).`

Период квантования задан  $\Delta T = 10$  с, горизонт прогнозирования  $n_p = 100$  шагов, горизонт управления  $n_c = 30$  шагов. Минимальное значение управляющего сигнала  $u(t)$  равно 0, что соответствует полностью закрытому терминалу VAV, а максимальное значение равно 2, что соответствует максимальному количеству воздуха на выходе терминала VAV, которое в 2 раза превышает среднее значение расхода приточного нагретого воздуха  $G(t)$ , поступающего в помещение от центральной вентиляционной системы.

Результаты расчета переходных процессов в вентиляционной системе VAV показаны на рис. 7. Здесь сопоставлены переходные процессы в системе без регулятора, с ПИД-регулятором, оптимизированным по быстродействию, и MPC-регулятором. Сравнение результатов показывает, что использование MPC-регулятора позволяет совершенствовать процесс регулирования теплового режима в помещении. Во-первых, существенно повышается быстродействие системы. Так, длительность переходного процесса системы без регулятора составляет 1 008 с (16,8 мин), с ПИД-регулятором 512 с (8,5 мин), с MPC-регулятором 262 с (4,2 мин). Во-вторых, при использовании MPC-регулятора практически отсутствует перерегулирование системы, что не приводит к «перетопам», когда температура в помещении поднимается выше заданной, что исключает дополнительные потери тепла.



**Рисунок 7** – Переходные процессы в вентиляционной системе VAV.

Следует отметить, что вышеизложенную методику управления системами ОВК на основе MPC-подхода можно обобщить на многомерные САУ и системы с несколькими задающими и возмущающими воздействиями.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, в работе рассмотрен вопрос апробации MPC-подхода для управления системами ОВК и обоснования возможности совершенствование процесса регулирования его применением на примере вентиляционной системы.

С этой целью детально показана реализация MPC-подхода, изложен принцип управления с использованием прогнозирующей модели, отмечены особенности управления с использованием MPC-регулятора. Также рассмотрена структура регулятора и критерий выбора оптимальных значений управляющего сигнала.

Показана реализация MPC-подхода для управления системами ОВК на примере приточной вентиляционной системы VAV учебной аудитории. Для моделирования вентиляционной системы VAV в среде Simulink пакета прикладных программ MATLAB разработана блок-диаграмма, для чего была использована предварительно установленная передаточная функция системы как ОУ. Для синтеза MPC-регулятора использован набор программных инструментов Model Predictive Control Toolbox пакета MATLAB.

Проведено исследование переходных процессов в вентиляционной системе VAV, сопоставлены переходные процессы в системе без регулятора, с ПИД-регулятором и MPC-регулятором. Сравнение результатов показало, что использование MPC-регулятора позволяет совершенствовать процесс регулирования теплового режима в помещении за счет повышения качества регулирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свистунов, В. М. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха объектов агро-промышленного комплекса и жилищно-коммунального хозяйства / В. М. Свистунов, Н. К. Пушняков. – Санкт-Петербург : Политехника, 2007. – 423 с. – Текст : непосредственный.
2. Sokolov, V. Diffusion of circular source in the channels of ventilation systems / V. Sokolov. – Текст : непосредственный // Advances in engineering research and application. ICERA 2018. Lecture notes in networks and systems. – 2019. – Volume 63. – P. 278–283.
3. Каменев, П. Н. Вентиляция. Учебное пособие / П. Н. Каменев, Е. И. Тертичник. – Москва : ACB, 2008. – 624 с. – Текст : непосредственный.
4. Sokolov, V. Criteria analysis of diffusion processes in channels of industrial ventilation systems / V. Sokolov. – Текст : непосредственный // Proceedings of the 7<sup>th</sup> international conference on industrial engineering. ICIE 2021. Lecture notes in mechanical engineering. Sochi, 17–21 May 2021. – 2022. – Volume 2. – P. 725–731. – DOI: 10.1007/978-3-030-85230-6\_85. – EDN: NSFIQF.
5. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика / В. А. Ананьев, Л. Н. Балуева, А. Д. Гальперин [и др.]. – Москва : Евроклимат, 2003. – 416 с. – Текст : непосредственный.
6. Sokolov, V. Increased measurement accuracy of average velocity for turbulent flows in channels of ventilation systems / V. Sokolov. – Текст : электронный // Proceedings of the 6th international conference on industrial engineering. ICIE 2020. Lecture notes in mechanical engineering. Sochi, Russia, 18–22 May 2020. – 2021. – Volume. 2. – P. 1182–1190. – DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9\_137. – EDN: UDCQKB.
7. Теория автоматического управления : учебник / Е. Э. Страшинин, А. Д. Заколяпин, С. П. Трофимов [и др.]. – Екатеринбург : УФУ, 2019. – 456 с. – Текст : непосредственный.
8. Лурье, Б. Я. Классические методы теории автоматического управления / Б. Я. Лурье, П. Дж. Энрайт. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2004. – 640 с. – Текст : непосредственный.
9. Надеждин, И. С. Системы управления нестационарным объектом на основе MPC-регулятора и ПИД-регулятора с нечеткой логикой / И. С. Надеждин, А. Г. Горюнов, Ф. Маненти. – Текст : непосредственный // Управление большими системами. Анализ и синтез систем управления. – 2018. – Выпуск 75. – С. 50–75.
10. Колодин, А. А. Разработка и исследование регулятора на основе прогнозирующей модели / А. А. Колодин, В. В. Ёлшин. – Текст : непосредственный // Вестник Самарского государственного университета. Серия технические науки. – 2021. – Том 29, № 1. – С. 36–44.
11. Model predictive econtrol toolbox. – Текст : электронный // MathWorks : [сайт]. – [1994–2022]. – URL: <https://www.mathworks.com/help/mpc/> (дата обращения 20.09.2022).
12. Марьясин, О. Ю. Управление тепловым режимом зданий с использованием прогнозирующих моделей / О. Ю. Марьясин, А. С. Колодкина. – Текст : непосредственный // Вестник Самарского государственного университета. Серия технические науки. – 2017. – № 1(53). – С. 122–132.
13. Судак, В. Системы VAV. Краткое описание / В. Судак, Я. Хендигер. – Краков : SMAV, 2009. – 80 с. – URL: [http://belimo.com.ua/files/VAV/VAV\\_book.pdf](http://belimo.com.ua/files/VAV/VAV_book.pdf) (дата обращения 22.09.2022). – Загл. с титул. листа. – Текст : электронный.
14. Ратушняк, Г. С. Регулювання витрати аеродинамічних потоків в системах вентиляції та аспірації : монографія / Г. С. Ратушняк, Р. В. Степанковский. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 112 с. – Текст : непосредственный.

Получена 30.09.2022

Принята 28.10.2022

В. М. АНДРІЙЧУК, В. І. СОКОЛОВ, М. Д. АНДРІЙЧУК  
УПРАВЛІННЯ СИСТЕМАМИ ОПАЛЕННЯ, ВЕНТИЛЯЦІЇ І  
КОНДИЦІОНУВАННЯ НА ОСНОВІ MPC-ПІДХОДУ  
Інститут будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства Луганського державного університету імені Володимира Даля

**Анотація.** У роботі розглянуто питання апробації MPC-підходу для управління системами опалення, вентиляції та кондиціонування, а також обґрунтовано можливості вдосконалення процесу регулювання його застосуванням на прикладі вентиляційної системи. Викладено принцип управління з використанням прогнозуючої моделі, відзначено особливості управління з використанням MPC-регулятора, розглянуто структуру регулятора та критерій вибору оптимальних значень керуючого сигналу. Показано реалізацію MPC-підходу на прикладі припливної вентиляційної системи VAV навчальної аудиторії. Для

моделювання вентиляційної системи в середовищі Simulink пакету прикладних програм MATLAB розроблено блок-діаграму, для синтезу MPC-регулятора використано набір програмних інструментів Model Predictive Control Toolbox. Проведено дослідження переходних процесів у вентиляційній системі VAV, зіставлені переходні процеси в системі без регулятора з ПІД-регулятором і MPC-регулятором. Порівняння результатів показало, що використання MPC-регулятора дозволяє вдосконалювати процес регулювання теплового режиму в приміщенні за рахунок підвищення якості регулювання.

**Ключові слова:** мікроклімат, MPC-регулятор, вентиляційна система VAV, температура, переходний процес.

VLADISLAV ANDRIICHUK, VLADIMIR SOKOLOV, NIKOLAI ANDRIICHUK  
CONTROL FOR SYSTEMS OF HEATING, VENTILATION AND AIR  
CONDITIONING BASED ON THE MPC-APPROACH

Construction, Architecture and Housing and Communal Services Institute of Vladimir Dahl Lugansk State University

**Abstract.** The paper considers the issue of approbation of the MPC-approach for the control of heating, ventilation and air conditioning systems, and also substantiates the possibility of improving the regulation process by its application on the example of a ventilation system. The principle of control using a predictive model is outlined, the features of control using the MPCcontroller are noted, the structure of the controller and the criterion for choosing the optimal values of the control signal are considered. The implementation of the MPC-approach is shown on the example of the supply VAV ventilation system in the classroom. To simulate the ventilation system in the Simulink environment of the MATLAB application package, the block diagram was developed, and the set of software tools Model Predictive Control Toolbox was used to synthesize the MPC controller. The study of transient processes the VAV ventilation system was carried out, the transient processes in the system without controller, with PID controller and MPC controller were compared. Comparison of the results showed that the use of the MPC controller makes it possible to improve the process of regulating the thermal regime in the room by increasing quality of regulation.

**Key words:** microclimate, MPC controller, VAV ventilation system, temperature, transient process.

**Андрийчук Владислав Николаевич** – старший преподаватель кафедры вентиляции, теплогазо- и водоснабжения института строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Научные интересы: вентиляция и теплогазоснабжение, гражданская инженерия.

**Соколов Владимир Ильич** – доктор технических наук, профессор кафедры вентиляции, теплогазо- и водоснабжения института строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Научные интересы: вентиляция и теплогазоснабжение, гражданская инженерия, механическая инженерия.

**Андрийчук Николай Данилович** – доктор технических наук, профессор; директор института строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства Луганского государственного университета имени Владимира Даля. Научные интересы: вентиляция и теплогазоснабжение, гражданская инженерия, механическая инженерия.

**Андрийчук Владислав Миколайович** – старший викладач кафедри вентиляції, теплогазо- та водопостачання інституту будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства Луганського державного університету імені Володимира Даля. Наукові інтереси: вентиляція та теплогазопостачання, цивільна інженерія.

**Соколов Володимир Ілліч** – доктор технічних наук, професор кафедри вентиляції, теплогазо- та водопостачання інституту будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства Луганського державного університету імені Володимира Даля. Наукові інтереси: вентиляція та теплогазопостачання, цивільна інженерія, механічна інженерія.

**Андрийчук Микола Данилович** – доктор технічних наук, професор; директор інституту будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства Луганського державного університету імені Володимира Даля. Наукові інтереси: вентиляція та теплогазопостачання, цивільна інженерія, механічна інженерія.

**Andriichuk Vladislav** – Senior Lecturer, Ventilation, Heat, Gas and Water Supply Department of Construction,

Architecture and Housing and Communal Services Institute of Vladimir Dahl Lugansk State University. Scientific interests: ventilation and heat and gas supply, civil engineering.

**Sokolov Vladimir** – D. Sc. (Eng), Professor, Ventilation, Heat, Gas and Water Supply Department of Construction, Architecture and Housing and Communal Services Institute of Vladimir Dahl Lugansk State University. Scientific interests: ventilation and heat and gas supply, civil engineering, mechanical engineering.

**Andriichuk Nikolai** – D. Sc. (Eng), Professor; Director of Construction, Architecture and Housing and Communal Services Institute of Vladimir Dahl Lugansk State University. Scientific interests: ventilation and heat and gas supply, civil engineering, mechanical engineering.

EDN: DFKVJG

УДК 504.062:628.35

**В. В. МАРКИН**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОЦЕССА АНАММОХ ДЛЯ ОЧИСТКИ ГОРОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД**

**Аннотация.** Очистка сточных вод от биогенных элементов является важной задачей, направленной на сохранение природных водоемов от техногенной эвтрофикации. С открытием процесса анаэробного окисления аммония (ANAMMOX) появилась возможность осуществлять очистку сточных вод от соединений азота более экономичным способом. Однако в связи с физиологическими особенностями анаммох-бактерий большая часть разработанных технологий, основанных на анаммох-процессе, предназначены для обработки сточных вод специфического состава и свойств: с повышенной температурой, высоким содержанием азота и низкой концентрацией органических веществ. В данной работе изучены основные технологии очистки сточных вод с применением процесса анаммох, определена наиболее подходящая технология для обработки бытовых стоков – DEAMOX и разработано предложение по ее улучшению.

**Ключевые слова:** сточные воды, биологическая очистка, анаэробное окисление аммония, ANAMMOX, SHARON, CANON, DEMON, DEMOX, азот, фосфор.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Существование процесса анаэробного окисления аммония (ANaerobic AMmonium OXidation) – ANAMMOX – было предсказано термодинамическими расчетами в конце XX в., в 90-е годы данный процесс был подтвержден экспериментально, а в 1999 г. открыты анатмох-бактерии [1]. Открытие анаммох-процесса существенно изменило представление науки о круговороте азота в природе, так как до этого считалось, что трансформация минеральных соединений азота в газообразный  $N_2$  происходит за счет денитрификации. Анаммох же – более короткий и менее энергозатратный путь получения  $N_2$ , заключающийся в окислении аммония кислородом нитритов.

Открытие этого процесса создало перспективы для совершенствования биологической очистки сточных вод (СВ). Процесс анаммох имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционными процессами нитрификации-денитрификации: отсутствует потребность в органическом веществе; потребность в кислороде снижается на 60 %; прирост ила сокращается на 90 %; образование  $CO_2$  в расчете на 1 кг удаленного азота уменьшается в 6–10 раз. Однако некоторые особенности физиологии анаммох-бактерий являются серьезной преградой для их широкомасштабного использования, а именно: низкие скорости роста и слабая адаптационная способность к различным факторам (концентрации токсичных веществ, резким изменениям нагрузки по субстратам, pH, температуры и др.).

В настоящее время в мире эксплуатируется около 100 производственных установок процесса анаммох, но большая часть из них используется для очистки специфических СВ, содержащих высокие концентрации азота, низкие концентрации органических веществ и повышенную температуру. К таким СВ относятся иловые воды метантенков, стоки пищевой промышленности, животноводческих и птицеводческих ферм. Для подобных СВ анаммох является наилучшим вариантом очистки от соединений азота. Тем не менее преимущества анаммох-процесса делают актуальным его применение и для очистки хозяйствственно-бытовых, а также близких к ним по составу производственных СВ.

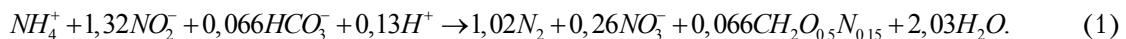
**Целью данной работы** является изучение разработанных технологий очистки СВ с процессом анаммох и определение перспективности их использования для обработки хозяйствственно-бытовых стоков.

© В. В. Маркин, 2022



## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

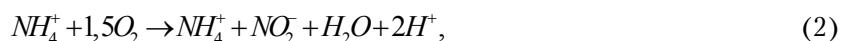
Анаммокс-бактерии являются анаэробными хемолитоавтотрофами. Они получают энергию за счет окисления аммония нитритом и используют в качестве источника углерода углекислый газ. Полное уравнение катаболических и анаболических реакций имеет вид [2]:



Аммоний и нитрит потребляются в соотношении 1:1,32. Основным продуктом анаммокс-реакции является молекулярный азот, а также до 10 % азота превращается в нитрат.

Развитие анаммокс-бактерий в природных условиях зафиксировано в пределах температур от -2 до 80 °С. Однако у изученных бактерий, взятых из ила канализационных очистных сооружений, оптимальные температуры роста составляют 25...35 °С при общем диапазоне роста – 10...40 °С [3]. При отклонении температуры от оптимального диапазона снижается и скорость роста. Например, в работе [3] установлено, что при 10...15 °С скорость роста снижается примерно в 2,5 раза, а при 20 °С – в 1,5 раза по сравнению со скоростью при оптимальной температуре. Анаммокс-процесс протекает в интервале pH от 6 до 9 с оптимумом – 7...8, по другим данным – в интервале от 6,7 до 9,1 с оптимумом – 7,5...8,0 [3]. Анаммокс-бактерии являются облигатными анаэробами и теряют активность в аэробных условиях. Однако, ингибирование является обратимым, что позволяет при чередовании аэробных и анаэробных условий проводить процессы частичной нитрификации и анаммокс [4]. Время удвоения анаммокс-бактерий составляет не менее 11 суток [2].

Для осуществления процесса анаммокс необходимо прежде всего наличие субстратов: ионов аммония и нитритов. Поскольку в исходных СВ азот содержится в основном в аммонийной форме, то предварительно необходимо окислить его часть до нитритов (нитритация). Стадии удаления аммония при сочетании нитритации и анаммокс-процесса в упрощенном виде описываются следующими уравнениями:



Большая часть исследователей отмечает, что условия классической биологической очистки в аэротенках со взвешенным илом и рециркуляцией не подходят для культивирования анаммокс-бактерий. Вследствие постоянного протока и рецикла активный ил (АИ) подвергается резкой смене условий среды, что оказывает отрицательное влияние на медленнорастущие анаммокс-бактерии и происходит их вымывание из реактора [5].

До настоящего времени разработаны следующие технологии реализации анаммокс-процесса: SHARON-ANAMMOX, CANON, OLAND, DEMON, DEAMOX и др.

В технологии SHARON-ANAMMOX СВ сначала поступают в биореактор SHARON, где примерно половина аммония окисляется до нитритов, после чего направляются в биореактор ANAMMOX. SHARON – биореактор проточного действия с периодической аэрацией и механическим перемешиванием. В биореакторе SHARON создаются условия для развития аммонийокисляющих бактерий (АОБ) и предотвращения роста нитритокисляющих бактерий (НОБ). Такие условия создаются поддержанием температуры СВ на уровне 35 °С и регулированием времени пребывания. При указанной температуре скорость роста АОБ выше, чем НОБ. Время пребывания регулируется так, чтобы оно было достаточным для накопления АОБ, но недостаточным для накопления НОБ, в результате чего последние вымываются из биореактора [6]. Второстепенными факторами регулирования процесса нитритации являются pH и концентрация O<sub>2</sub>. Константа насыщения O<sub>2</sub> у АОБ составляет 0,3 мгO<sub>2</sub>/л, а у НОБ 1,1 мгO<sub>2</sub>/л, поэтому при лимитировании растворенного кислорода (даже на уровне 1 мгO<sub>2</sub>/л) АОБ вытесняют НОБ. Темпы роста НОБ при pH = 7 в восемь раз выше, чем при pH = 8, в то время как влияние pH на рост АОБ является незначительным, поэтому процесс нитритации рекомендуется производить в слабощелочных условиях. Процесс анаммокс в технологии SHARON-ANAMMOX реализован в SBR-реакторе периодического действия с поочередным заполнением, отстаиванием и выведением фаз. В таких условиях анаммокс-бактерии формируют гранулы размером до нескольких миллиметров. Технология SHARON-ANAMMOX была применена впервые на очистных сооружениях в Роттердаме для очистки фильтрата анаэробно сброшенных осадков. Для выхода на рабочий режим производственной установки потребовалось 3,5 года. Эффективность удаления аммония составила 80 % при нагрузке по азоту 1,2 кгN/(м<sup>3</sup>·сут). Начальная концентрация

аммония находилась на уровне 1 500 мг/л [6]. В дальнейшем время запуска биореакторов этого типа было снижено.

В настоящее время большей популярностью пользуются однореакторные технологии анаммокс, одной из которых является CANON. В этой технологии используется сочетание нитритации и анаммокс в одном биореакторе, в котором АОБ, окисляя аммоний в нитрит, потребляют кислород и создают тем самым анаэробные условия для развития анаммокс-бактерий. Основными факторами сдерживания роста НОБ являются регулирование содержания растворенного кислорода на уровне 0,2...0,3 мгO<sub>2</sub>/л и нагрузка по аммонию. Температурный диапазон технологии CANON более широкий, чем SHARON-ANAMMOX, и составляет от 18 до 35 °С. Объемная скорость удаления азота по технологии CANON в SBR-реакторе составляет в среднем 810 гN/(м<sup>3</sup>·сут) [7].

Еще одна распространенная однореакторная технология процесса анаммокс-DEMON. Данная технология реализуется в биореакторах типа SBR. Содержимое биореактора циклически аэрируется и перемешивается. Процесс регулируется автоматически по трем параметрам: pH, концентрации O<sub>2</sub> (поддерживается на уровне около 0,5 мгO<sub>2</sub>/л) и времени обработки. Особенностью этой технологии является разделение иловой смеси в гидроциклоне, при котором гранулы с анаммокс-бактериями и АОБ возвращаются в биореактор, а меньшие по размерам биофлоккулы с АОБ и НОБ удаляются. Благодаря этому в биореакторе накапливается масса анаммокс-бактерий. Биореакторы DEMON рассчитаны на нагрузку 600...1 200 гN/(м<sup>3</sup>·сут) с эффектом удаления общего азота 85...90 % [8].

Все рассмотренные выше технологии требуют строгого контроля и соблюдения ряда условий проведения процесса, которые довольно сложно выдержать в производственных масштабах. Для преодоления указанных недостатков была разработана альтернативная технология с применением анаммокс-процесса – DEAMOX. Суть технологии заключается в разделении расхода СВ на два равных потока, один из которых направляется в реактор полной нитрификации, в котором аммиак окисляется до нитритов и нитратов. При этом не ставится задача получения только нитритов, поэтому процесс не требует специального контроля. Далее нитрифицированные СВ смешиваются в DEAMOX-реакторе со второй половиной СВ, в которой присутствует некоторое количество донора электронов (органики или сульфидов). Количество восстановителей должно быть таким, чтобы в DEAMOX-реакторе произошел неполный процесс денитрификации: нитраты восстановились до нитритов. В этом случае в DEAMOX-реакторе будут созданы условия для развития анаммокс-бактерий. Для стабильной работы DEAMOX-реактора соотношение ХПК/N должно быть в пределах 2,0...3,5. Процесс DEAMOX был исследован в лабораторных условиях в USAB-реакторах при нагрузке по азоту около 400 мгN/(л·сут). В результате, удаление общего азота составило около 87 % [9].

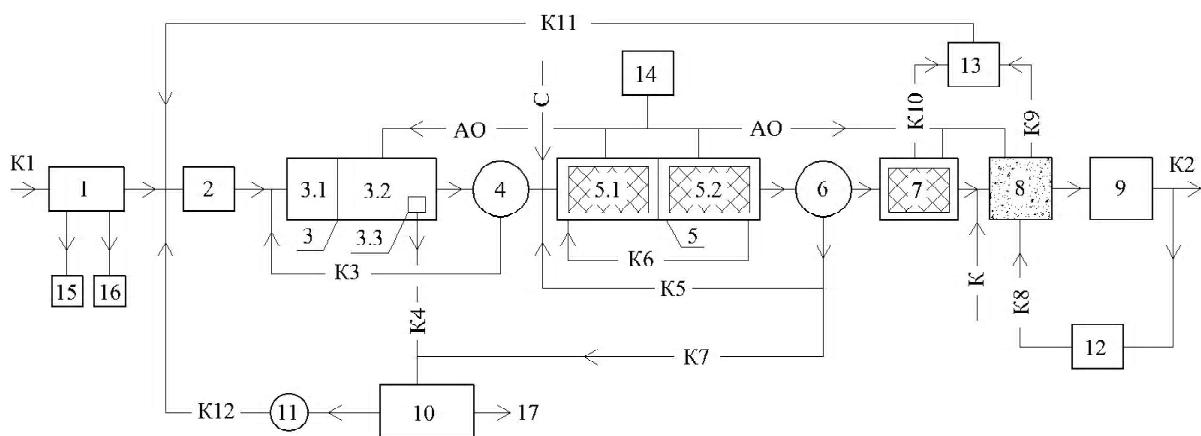
В промышленном масштабе процесс DEAMOX был реализован для очистки хозяйственно-бытовых СВ в несколько измененном и дополненном виде, получившем название БХ-DEAMOX. По этой технологии СВ подвергаются вначале физико-химической очистке (коагуляции и отстаиванию в тонкослойном отстойнике), при которой на 50...70 % снижается БПК. Далее СВ делятся на два равных потока, один из которых направляется в биореактор полной нитрификации, после чего подается в аноксидный биореактор, в который поступает также второй поток. В обоих биореакторах устанавливается ершевая загрузка для прикрепления активной биомассы. В аноксидный биореактор СВ поступают сверху-вниз. По мере прохождения стоков через загрузку в верхних слоях происходит процесс частичной денитрификации и образуются нитриты. После исчерпания органических веществ в средней и нижней зоне загрузки создаются условия для протекания анаммокс-процесса. Из нижней части аноксидного реактора СВ отводятся в аэробный биореактор доочистки с ершевой загрузкой, где происходит окисление остаточных количеств аммонийного и нитритного азота. Далее в СВ добавляется реагент для связывания остаточного фосфора, после чего стоки фильтруются через антрацитовый фильтр [10]. Разработана также и альтернативная схема БХ-DEAMOX, в которой весь поток СВ после физико-химической очистки направляется сначала в аноксидный биореактор, куда перекачивается также иловая смесь из конца нитрификатора, и уже потом подается в нитрификатор. Общая эффективность очистки бытовых СВ по данной технологии заявлена до уровня требований к воде водоемов рыбохозяйственного назначения [11].

Преимуществами технологии БХ-DEAMOX по сравнению с другими технологиями являются: отсутствие сложного контроля за образованием нитритов; увеличение дозы ила за счет применения насадок; возможность осуществления процесса анаммокс при низких температурах (8...15 °С) (снижение активности анаммокс-бактерий компенсируется более высокой дозой ила).

Таким образом, из всех рассмотренных технологий именно БХ-DEAMOX лучше всего подходит для очистки хозяйственно-бытовых СВ. Однако эта технология имеет существенный недостаток: предварительная физико-химическая очистка с введением коагулянтов увеличивает эксплуатационные затраты и приводит к загрязнению осадков железом или алюминием, что делает невозможным их утилизацию в качестве ценных органических удобрений.

Для устранения указанного недостатка предлагается изменить технологию БХ-DEAMOX и вместо предварительной физико-химической очистки осуществлять предварительную биологическую очистку в биореакторах с анаэробной и аэробной зонами и последующим вторичным отстаиванием. Это позволит снизить до требуемых значений изначально неблагоприятное для технологии DEAMOX соотношение ХПК/Н в бытовых СВ (8...12), а также очищать СВ от фосфатов хорошо известным улучшенным способом биологического удаления фосфора. После прохождения предварительной биологической очистки, СВ могут быть направлены в биореакторы удаления азота по технологии DEAMOX.

Принципиальная схема очистной станции с предлагаемой технологией представлена на рисунке.



**Рисунок** – Принципиальная схема очистной станции бытовых СВ с применением технологии улучшенного биологического удаления фосфора и технологии DEAMOX: 1 – блок грубой механической очистки; 2 – усреднитель; 3 – биореактор 1-й ступени; 3.1 – анаэробная зона; 3.2 – аэробная зона; 3.3 – тонкослойный илоотделитель; 4 – вторичный отстойник 1-й ступени; 5 – биореактор 2-й ступени с загрузкой; 5.1 – аноксидная зона (процесс DEAMOX); 5.2 – аэробная зона (нитрификатор); 6 – вторичный отстойник 2-й ступени; 7 – биореактор доочистки; 8 – угольный фильтр; 9 – блок УФ-обеззараживания; 10 – блок мех. обработки избыточного ила; 11 – н/ст. фильтрата; 12 – н/ст. технической воды; 13 – н/ст. регенерационной и промывной воды; 14 – компрессорная; 15 – накопитель отбросов; 16 – накопитель песка; 17 – высушенный осадок; К1 – исходные СВ; К2 – очищенные СВ; К3 – циркулирующий АИ 1-й ступени; К4 – избыточный АИ 1-й ступени; К5 – циркулирующий АИ 2-й ступени; К6 – нитратный рецикл; К7 – избыточный АИ 2-й ступени; К8 – техническая вода; К9 – промывная вода; К10 – регенерационная вода; К11 – регенерационная и промывная вода в усреднитель; К12 – фильтрат; АО – воздуховод; К – раствор коагулянта; С – раствор  $\text{NaHCO}_3$ .

Работает предлагаемая схема следующим образом. СВ проходят грубую механическую очистку на решетке, песколовке и поступают в усреднитель. Из усреднителя СВ направляются в анаэробный зону биореактора 1-й ступени, куда также подается циркулирующий АИ из вторичного отстойника 1-й ступени. В анаэробной зоне АИ потребляет легко окисляемую органику, при этом внутриклеточные полифосфатные связи разрываются с выделением фосфатов. Далее иловая смесь поступает в аэробную зону, где происходит восстановление полифосфатных связей, которое сопровождается усиленным потреблением фосфатов. В результате циркуляции между анаэробной и аэробной зонами в АИ развиваются фосфатаккумулирующие бактерии (ФАО), которые в аэробной зоне накапливают в три раза больше фосфора, чем обычный АИ. Удаление фосфатов происходит вместе с удалением избыточного АИ. Биореактор 1-й ступени рассчитывается на снижение БПК<sub>полн</sub> с 400...200 до 40...50 мгО<sub>2</sub>/л, процесс проводится до начала нитрификации.

Легко заметить, что эффективность удаления фосфора биологическим способом напрямую зависит от прироста биомассы ФАО, а значит от нагрузки на АИ. В биореакторе 1-й ступени нагрузку

можно повышать до значений 800...900 мгБПК<sub>поли</sub>/(г·сут) (прирост АИ при этом составит 0,75...0,8 г/гБПК<sub>поли</sub>), что значительно выше нагрузок, при которых работают наиболее распространенные в мире одноиловые технологии совместного биологического удаления азота и фосфора (UCT, MUCT, JHB и др.). В одноиловых схемах нагрузка должна быть снижена до такого значения, при котором стабильно протекает процесс нитрификации (100...200 мгБПК<sub>поли</sub>/(г·сут)), что не позволяет повысить эффективность биологического удаления фосфора. При таких нагрузках прирост ила будет составлять 0,4...0,55 г/гБПК<sub>поли</sub>. Применение предлагаемой двухступенчатой схемы с разными иловыми системами позволит максимально эффективно удалять фосфор и органические вещества на 1-й ступени биологической очистки и соединения азота на второй. Выведение избытка ила лучше осуществлять из тонкослойного илоотделителя, расположенного в конце аэробной зоны биореактора 1-й ступени, так как при выведении его из вторичного отстойника часть фосфатов в анаэробных условиях будет успевать выделяться из бактериальных клеток.

После вторичного отстойника 1-й ступени СВ направляются на 2-ю ступень биологической очистки в аноксидную зону биореактора 2-й ступени, куда также подается возвратный АИ из вторичного отстойника 2-й ступени и иловая смесь из конца нитрификатора. В аноксидной зоне размещаются насадки для прикрепления биомассы. Вид загрузочного материала подбирается по техническим характеристикам: удельной поверхности, устойчивости к заливанию, способности к регенерации. По дну прокладывается система крупнопузырчатой аэрации, обеспечивающая перемешивание свободноплавающей биомассы при минимальной концентрации растворенного кислорода (до 0,3 мгО<sub>2</sub>/л), а также периодическую регенерацию загрузки. В аноксидной зоне реализуется технология DEAMOX: в условиях ограниченного количества органических веществ происходит частичная денитрификация с образованием нитритов и далее процесс анаммокс. Перед аноксидной зоной в СВ при необходимости подается раствор соды для обеспечения оптимального рН (7,5–8,0). Из аноксидной зоны иловая смесь направляется в нитрификатор, в котором также размещены насадки для закрепления биомассы. В нитрификаторе происходит окисление оставшейся половины азота аммонийного до нитратов. Из нитрификатора иловая смесь поступает во вторичный отстойник 2-й ступени.

После основных этапов стоки подаются в аэробный биореактор доочистки с фиксированной загрузкой, в котором происходит глубокая доочистка СВ от остаточного количества аммония, взвешенных и органических веществ. В биореактор доочистки подается воздух через мелкопузырчатую систему аэрации. Регенерация загрузки осуществляется периодически интенсивным барботированием. Регенерационную воду отводят в усреднитель. В зависимости от требуемой степени очистки стоки после биореактора доочистки могут быть направлены на дополнительную обработку в угольный фильтр. При повышенных остаточных количествах фосфатов перед фильтром следует предусмотреть введение раствора коагулянта небольшой дозой. После угольного фильтра вода направляется на ультрафиолетовое обеззараживание и далее сбрасывается на рельеф или используется в технических целях. Отмывка угольного фильтра предусматривается очищенной водой с подачей воздуха. Промывная вода перекачивается в усреднитель.

Избыточный АИ 1-й и 2-й ступеней подается в блок обработки осадков, где происходит его уплотнение на ленточных сгустителях, механическое обезвоживание и термическая сушка. Высушенный осадок полностью обезврежен и готов к использованию в качестве органического удобрения, в том числе для сельскохозяйственных культур. На очистных сооружениях небольшой производительности термическая сушка может быть заменена биотермическим компостированием или вермикомпостированием.

## ВЫВОДЫ

Рассмотрены и проанализированы существующие технологии очистки СВ с процессом анаммокс и определено, что наиболее подходящей технологией для хозяйствственно-бытовых стоков является технология BX-DEAMOX. Разработано предложение по улучшению данной технологии, позволяющее обеспечивать максимально эффективную биологическую очистку стоков от фосфора и энергоэффективную очистку от соединений азота с применением процесса анаммокс, а также получать ценные незагрязненные органические удобрения, пригодные для использования в сельском хозяйстве.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Missing lithotroph identified as new planctomycete / M. Strous, J. A. Fuerst, E. H. Kramer [et al.]. – Текст : непосредственный // Nature. – 1999. – Volume 400. – P. 446–449.

2. The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slow lygrowing anaerobic ammonium-oxidizingmicroorganism / M. Strous, J. J. Heijen, J. G. Kuenen [et al.]. – Текст : непосредственный // Appl. Microbiol. Biotechnol. – 1998. – Volume 50. – P. 589–596.
3. Литти, Ю. В. Анаэробное окисление аммония и метаногенез в системах аэробной очистки сточных вод с иммобилизацией микроорганизмов : специальность 03.02.03 «Микробиология», 03.01.06 «Биотехнология (в том числе бионанотехнологии)» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Юрий Владимирович Литти ; ФГБУН Институт микробиологии им. С. Н. Виноградского РАН. – Москва, 2012. – 27 с. – Текст : непосредственный.
4. Роль анаммоx-бактерий в очистке сточных вод от азота / А. Ю. Каллиста, А. Г. Дорофеев, Ю. А. Николаев [и др.]. – Текст : непосредственный // Микробиология. – 2016. – Том 85, № 2. – С. 126–144.
5. Мультивидовые биопленки в экологии, медицине и биотехнологии / А. Н. Ножевникова, Е. А. Бочкова, В. К. Плакунов [и др.]. – Текст : непосредственный // Микробиология. – 2015. – Том 84, № 6. – С. 623–644.
6. Van Dongen, L.G.J. M. The Combined Sharon/Anammox Process / L.G.J.M. van Dongen, M.S.M. Jetten, Mark C. M. van Loosdrecht. – London : IWA Publishing, 2001. – 64 p. – Текст : непосредственный.
7. Partial nitrification and anammox process: a method for high strength optoelectronic industrial wastewater treatment / A. Daverey, S. H. Su, Y. T. Huang [et al.]. – Текст : непосредственный // Water Research. – 2013. – Volume 47, № 9. – P. 2929–2937.
8. Deammonification for Cost-Effective Sidestream Treatment. – Текст : электронный // MWEA Process Seminar : [сайт]. – November 8, 2017. – URL: [https://mi-wea.org/docs/7.\\_Pugh\\_Lucy-Deammonification\\_for\\_Cost-Effective\\_Sidestream\\_Treatment.pdf](https://mi-wea.org/docs/7._Pugh_Lucy-Deammonification_for_Cost-Effective_Sidestream_Treatment.pdf) (дата обращения: 27.09.2022).
9. Трухина, А. И. Реактивация илов-биокатализаторов после длительного хранения и запуск Deamox-процесса / А. И. Трухина, М. А. Гладченко, С. В. Калюжный. – Текст : непосредственный // Биотехнология. – 2010. – № 5. – С. 68–75.
10. Очистка муниципальных сточных вод с повторным использованием воды и обработанных осадков : теория и практика / Н. И. Куликов, А. Н. Ножевникова, Г. М. Зубов [и др.]. – Москва : Логос, 2014. – 400 с. – Текст : непосредственный.
11. Патент № 2749273 С1 Российская Федерация, МПК C02F 3/30, C02F 9/14. Способ глубокой биологической очистки сточных вод с процессом ANAMMOX биоценозом, иммобилизованным на ершовой загрузке : № 2020141572 : заявл. 16.12.2020 : опубл. 07.06.2021 / Вильсон Е. В., Зубов М. Г., Кадревич А. А. – 16 с. – EDN: GKXCXE. – Текст : непосредственный.

Получена 07.10.2022

Принята 28.10.2022

В. В. МАРКІН  
ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ПРОЦЕСУ АНАММОХ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ  
МІСЬКИХ СТІЧНИХ ВОД  
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** Очищення стічних вод від біогенних елементів є важливим завданням, спрямованим на збереження природних водоймищ від техногенної евтрофікації. З відкриттям процесу анаеробного окислення амонію (ANAMMOX) з'явилася можливість здійснювати очищення стічних вод від сполук азоту більш економічним способом. Однак у зв'язку з фізіологічними особливостями анаммоx-бактерій більшість розроблених технологій, заснованих на анаммоx-процесі, призначенні для обробки стічних вод специфічного складу та властивостей: з підвищеною температурою, високим вмістом азоту та низькою концентрацією органічних речовин. У даній роботі вивчено основні технології очищення стічних вод із застосуванням процесу анаммоx, визначено найбільшу доцільність технології для обробки побутових стоків – DEAMOX та розроблено пропозицію щодо її покращення.

**Ключові слова:** стічні води, біологічне очищення, анаеробне окислення амонію, ANAMMOX, SHARON, CANON, DEMON, DEMOX, азот, фосфор.

VYACHESLAV MARKIN  
PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF THE ANAMMOX PROCESS FOR  
URBAN WASTEWATER TREATMENT  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** Wastewater treatment from biogenic elements is an important task aimed at preserving natural water bodies from technogenic eutrophication. With the discovery of the process of anaerobic oxidation of ammonium (ANAMMOX), it became possible to treat wastewater from nitrogen compounds in a more

economical way. However, due to the physiological characteristics of anammox bacteria, most of the developed technologies based on the ANAMMOX process are designed to treat wastewater with a specific composition and properties: high temperature, high nitrogen content and low concentration of organic substances. In this paper, the main wastewater treatment technologies using the anammox process have been studied, the most suitable technology for the treatment of domestic wastewater – DEAMOX – has been identified and a proposal for its improvement has been developed.

**Key words:** wastewater, biological treatment, anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX, SHARON, CANON, DEMON, DEMOX, nitrogen, phosphorus.

**Маркин Вячеслав Владимирович** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры техносферной безопасности ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: очистка сточных вод.

**Маркін В'ячеслав Володимирович** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри техносферної безпеки ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: очищення стічних вод.

**Markin Vyacheslav** – Ph. D. (Eng), Senior Lecturer, Technosphere Safety Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: wastewater treatment.

EDN: EIDFLX

УДК 628.477:615.46/.45

**В. Н. РАДИОНЕНКО**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **О ПЕРСПЕКТИВАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЧЁТКИХ ОБОБЩЁННЫХ КРИТЕРИЕВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ПРИМЕРЕ ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

**Аннотация.** В статье рассмотрен вопрос о возможном использовании моделей неопределенности для определения качества окружающей природной среды. Проанализированы практические модели неопределенности, которые не связаны с концепцией случайности, а отражают неполноту наших знаний об изучаемом объекте и его взаимодействии с окружающей средой. На основании проведенного анализа предложено рассмотреть гибкую модель поиска обобщенного критерия качества окружающей природной среды, которая базируется на многокритериальной природе процесса принятия решения и уменьшении неопределенности, возникающей в случае конфликта и нечеткости целей при наличии многих локальных критериев. Для решения проблемы поиска обобщенного критерия качества окружающей среды предложено рассмотреть как вариант использования нечеткого нелинейного программирования с несовместимыми критериями, переменными управления и нелинейными ограничениями. Для более четкого и взвешенного решения поставленной задачи обосновано применение концепции оптимальности по Парето. В результате, предложенный нечеткий обобщенный критерий определения качества окружающей природной среды способен агрегировать множество показателей различной природы воздействия и служит определённой мерой для анализа функционирования теплоэлектростанций.

**Ключевые слова:** теплоэлектростанция, качество среды, критерий качества, модель неопределенности, вектор, параметры, функция принадлежности.

### **ЦЕЛЬ**

Анализ классических моделей неопределенности с целью возможного их использования для определения качества окружающей природной среды на примере функционирующих теплоэлектростанций.

### **ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ**

По состоянию на текущий период на территории Донецкой Народной Республики функционируют две теплоэлектростанции (Зуевская ТЭС и Старобешевская ТЭС). Доподлинно известно, что ТЭС оказывают негативное воздействие на окружающую природную среду.

ТЭС производят электрическую и тепловую энергию. Основная масса топлива превращается в выбросы, поступающие в окружающую среду в виде газообразных и твёрдых продуктов сгорания. Воздействие ТЭС на окружающую среду принято разделять на:

- физические воздействия, включающие в себя: акустическое и электромагнитное воздействие, радиационное и тепловое загрязнение;
- непосредственные воздействия, связанные с привнесением или изъятием из природной среды отдельных компонентов (химическое загрязнение, выбросы вредных веществ);
- косвенные воздействия, включающие в себя: гравитационное осаждение твердых частиц и аэрозолей, химические реакции вредных веществ, выброшенных в атмосферу и гидросферу.

Как видно, существует большое количество действующих факторов на окружающую среду. В данной работе предлагается рассмотреть вариант использования нечетких обобщенных критериев для определения качества окружающей среды на примере функционирования ТЭС.

© В. Н. Радионенко, 2022



Для характеристики качества окружающей природной среды необходимо учитывать множество критериев  $K_i$  (разного рода воздействия: физические, непосредственные, косвенные), которые имеют различные размерности, физический смысл и диапазон изменения. Простое усреднение таких показателей не имеет смысла и необходимо использовать методы многокритериального анализа для построения обобщенных критериев.

Наиболее общепринятое понимание неопределенности как случайного события привело к появлению подходов, использующих теории вероятностей и случайных процессов. Однако, применение вероятностных методов сопровождается серьезными трудностями при их практической реализации. Существуют и другие модели неопределенности, которые не связаны с концепцией случайности, а отражают неполноту наших знаний об изучаемом объекте и его взаимодействии с окружающей средой. К основным моделям неопределенности такого типа относятся следующие:

- антиоптимизация или модель неопределенности, возникающая из *неспецифичности* равновозможных альтернатив, как продолжение интервального анализа;
- теоретико-игровая модель неопределенности, источником которой служит *конфликт* между различными целями;
- вербальная модель неопределенности, возникновение которой следует из *нечеткости (расплывчатости)*, т. е. неясно или неточно выраженных лингвистических терминов при описании количественных или качественных целей системы. Теория нечетких множеств (*fuzzy set*) возникла как новая система понятий, в которой лингвистическая неопределенность может быть отображена в математических терминах.

Здесь рассматривается гибкая модель поиска обобщенного критерия качества окружающей природной среды, базирующаяся на многокритериальной природе процесса принятия решения и уменьшении неопределенности, возникающей при наличии конфликта и нечеткости целей при наличии многих локальных критериев.

Проблема поиска обобщенного критерия качества окружающей среды рассмотрена как проблема нечеткого нелинейного программирования с  $n$  несовместимыми критериями,  $m$  – переменными управления и  $k$  нелинейными ограничениями: найти

$$\text{Optimize } K[K_{\text{th}}(X), K_{\text{ec}}(X)] \quad (1)$$

при условии

$$C_i \equiv G_{L_i} \leq G_i(X) \leq G_{U_i}, i = 1, 2, \dots, k. \quad (2)$$

$$x_{L_i} \leq x_i \leq x_{U_i}, i = 1, 2, \dots, m, \quad (3)$$

где  $K_{\text{th}}(X)$ ,  $K_{\text{ec}}(X)$  представляют нечеткие локальные критерии качества окружающей природной среды;

$X(x_1, x_2, \dots, x_m)$  – вектор искомых переменных управления;

$\mathbf{GL}_i$ ,  $\mathbf{GU}_i$  – нижний и верхний пределы ограничений  $G_i(X)$ , соответственно, и  $x_{L_i} \leq x_i \leq x_{U_i}$  – нижняя и верхняя границы для искомых переменных управления.

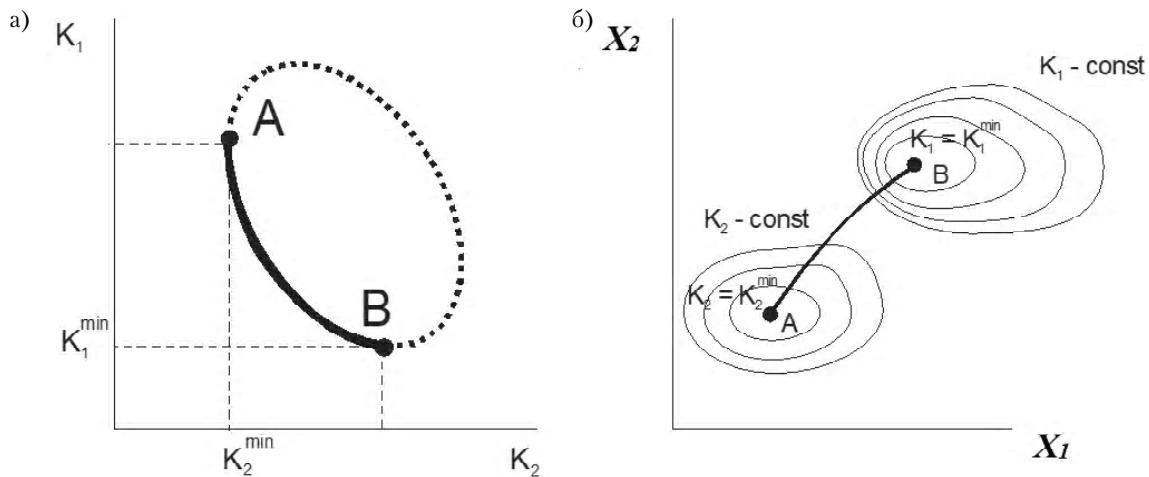
Полагается, что  $K_j(X) = \|P_j M_j(X)\|$  – «расстояние» между желаемой (идеальной) эффективностью системы  $P_j$  и ее реальной моделью  $M_j$ . Для критерия  $K_{\text{th}}$  значение  $P_j$  соответствует теоретическому максимуму эффективности целевой функции. Решение многокритериальной проблемы заключается в нахождении компромисса среди всех критерии и ограничений и может быть сформулировано следующим образом: построить функцию

$$K = K_1 \cap K_2 \cap \dots \cap K_n. \quad (4)$$

Параметры модели  $X_{opt}$  отождествляют компромиссное решение для выбранных критериев эффективности. Многокритериальный подход базируется на комбинации формальной и неформальной процедур принятия решения для нахождения альтернативного решения проблемы. Формальные математические средства для разрешения многокритериальной проблемы отсутствуют и необходима дополнительная информация.

В пределах проблемы многокритериального нелинейного программирования может быть определен только диапазон искомых переменных, где значение одного из локальных критериев не может быть улучшено без ухудшения значений остальных критериев. Это множество значений параметров называется множеством Парето. Концепция оптимальности по Парето – это формальное решение

многокритериальной задачи. Геометрическая интерпретация множества Парето (линия **AB**) для случая двух критериев  $K_{th} = K_1$ ,  $K_{ec} = K_2$  и двух переменных управления дана на рисунке.



Здесь  $K_1^{\min}$  интерпретируется как минимальное отклонение модели эффективности от идеального решения. В настоящее время не существует общепринятого метода определения множества Парето, который произвел бы подходящее множество решений для всех проблем. Это мотивирует дальнейшее развитие надежных подходов к решению многокритериальных проблем.

В области Парето не существует единственного оптимального решения, а скорее набор альтернативных решений. Эти решения оптимальны в более широком смысле, т. к. никакие другие решения не являются согласованными для множества критериев. Оптимальность по Парето можно рассматривать как средство генерирования альтернатив, из которых принимающий решения может выбрать окончательное решение.

Следующий шаг состоит в определении некоторого набора параметров из множества Парето с помощью дополнительной внешней информации и обращения вектора критерия в скалярный. Этот шаг фактически является проблемой принятия решения и не может быть формализован. Существует много способов преобразования векторного критерия вектор в скалярный.

Основная концепция при выборе окончательного решения, которое удовлетворяет множеству Парето, базируется на минимизации неопределенности. Обычно рассматриваются две основные тенденции (изоляционистская и кооперативная) для объединения вектора локальных критериев в глобальный (или обобщенный). Изоляционистская схема свертки может быть аддитивной (глобальный критерий представлен как взвешенная сумма локальных критериев) и энтропийной (глобальный критерий представлен как сумма логарифмов локальных критериев).

Если поведение каждого критерия согласуется с общей целью – минимизировать общий (кооперативный) критерий, то схему свертки можно представить в виде

$$K_C(X) = \min [w_i(K_i(X) - K_i^0)] \quad 1 \leq i \leq n, \quad X \in X_P, \quad (5)$$

где  $w_i$  – весовые коэффициенты,

$K_i^0$  – нижняя грань желаемого результата (идеальная точка), которая приемлема в коалиции,

$K_C$  – глобальный критерий. Если возможно прийти к соглашению о предпочтениях (весах) для каждого критерия, тогда окончательное решение может быть найдено как решение проблемы скалярного нелинейного программирования:

$$K_C(X) = \min \sum_{i=1}^n |w_i(K_i(X) - K_i^0)|, \quad X \in X_P. \quad (6)$$

Если же у принимающих решение нет согласия относительно выбора веса, тогда становится предпочтительней арбитражная схема. Классическая арбитражная схема была получена строго математически Нэшем, но очень часто критиковалась из общих соображений:

$$K_C(X) = \min \prod_{i=1}^n |K_i(X) - K_i^0|, \quad X \in X_P. \quad (7)$$

Все обсужденные схемы свертки пытаются уменьшить неопределенность, возникающую из конфликта между различными критериями в области Парето.

Здесь допускается, что локальные критерии, а также различные ограничения в плохо структурированной ситуации могут быть представлены нечеткими множествами.

Окончательное решение определяется моделью как результат пересечения всех нечетких критериев и ограничений, отображеных их функциями принадлежности  $\mu(X)$ :

$$\mu_K(X) = \mu_{Kth}(X) \cap \mu_{Kec}(X) \cap \mu_{Gi}(X), \quad i = 1, 2, \dots, k; \quad X \in X_P. \quad (8)$$

Функция принадлежности целей и ограничений может быть выбрана линейной или нелинейной в зависимости от контекста проблемы. Одна из возможных нечетких схем свертки представлена ниже:

- В качестве начального приближения выбирают вектор  $X$ . Максимальные (минимальные) значения для каждого критерия  $K_i$  устанавливаются как результат решения скалярной задачи максимизации (минимизации) для каждого из критериев. Результаты обозначены как «идеальные» точки  $\{X_j^0, j = 1 \dots m\}$ .
- Матрица  $[T]$ , где элементы диагонали – «идеальные» точки, определена следующим образом:

$$[T] = \begin{bmatrix} K_1(X_1^0) & K_2(X_1^0) \dots & K_n(X_1^0) \\ K_1(X_2^0) & K_2(X_2^0) \dots & K_n(X_2^0) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ K_1(X_m^0) & K_2(X_m^0) \dots & K_n(X_m^0) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

- Максимальная и минимальная границы критериев определяются:

$$\begin{aligned} K_i^{\min} &= \min_j K_j(X_j^0) = K_i(X_i^0), \quad i = 1 \dots n; \\ K_i^{\max} &= \max_j K_j(X_j^0), \quad i = 1 \dots n. \end{aligned} \quad (10)$$

- Функция принадлежности для всех нечетких целей представлена в виде:

$$\mu_{K_i}(X) = \begin{cases} 0, & \text{if } K_i(X) > K_i^{\max} \\ \frac{K_i^{\max} - K_i}{K_i^{\max} - K_i^{\min}}, & \text{if } K_i^{\min} < K_i \leq K_i^{\max}, \\ 1, & \text{if } K_i(X) \leq K_i^{\min} \end{cases}, \quad (11)$$

- Формулируются нечеткие ограничения:

$$C_j(X) \leq C_j^{\max} + d_j, \quad j = 1, 2, \dots, q, \quad (12)$$

где  $d_j$  – реальный параметр, который обозначает расстояние от допустимого смещения для границы  $C_j^{\max}$   $j$ -го ограничения. Соответствующая функция принадлежности определена следующим образом:

$$\mu_{K_i}(X) = \begin{cases} 0, & \text{if } K_i(X) > K_i^{\max} \\ \frac{K_i^{\max} - K_i}{K_i^{\max} - K_i^{\min}}, & \text{if } K_i^{\min} < K_i \leq K_i^{\max}, \\ 1, & \text{if } K_i(X) \leq K_i^{\min} \end{cases}, \quad (13)$$

- Окончательное решение определено как пересечение всех нечетких критериев и ограничений, представленных их функциями принадлежности. Эта проблема сводится к стандартной проблеме нелинейного программирования: найти такие значения  $X$  и  $\lambda$ , что, максимизируя  $\lambda$ , выполняются условия:

$$\begin{aligned}\lambda &\leq \mu_{ki}(X), \quad i=1, 2, \dots, n; \\ \lambda &\leq \mu_{Cj}(X), \quad j=1, 2, \dots, q.\end{aligned}\tag{14}$$

Решение многокритериальной проблемы раскрывает значение оператора оптимальности и зависит от опыта принимающего решения и его понимания проблемы.

## ВЫВОДЫ

Решение проблем негативного воздействия ТЭС на окружающую природную среду требует комплексного подхода с применением различных подходов, в том числе, не исключен вариант использования нечётких обобщённых критериев.

Таким образом, предложенный нечеткий обобщенный критерий определения качества окружающей природной среды способен агрегировать множество показателей различной природы воздействия и служит определённой мерой анализа функционирования ТЭС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bache, K. UCI Machine Learning Repository / K. Bache, M. Lichman. – Irvine, CA : University of California, School of Information and Computer Science. – 2013. – 187 p. – Текст : непосредственный.
2. Носков, А. С. Воздействие ТЭС на окружающую среду и способы снижения наносимого ущерба / А. С. Носков, М. А. Савинкина, Л. Я. Анищенко. – Текст : непосредственный // Научно-практический журнал «Труды ГПНТБ СО РАН». – Новосибирск : ГПНТБ, 2005. – С. 8–12.
3. Штовба, С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. – Текст : непосредственный // Инженерно-технический журнал. – 2007. – № 8. – С. 24–33.
4. Rotshtein, A. Identification of a nonlinear dependence by a fuzzy knowledgebase in the case of a fuzzy training set / A. Rotshtein, S. Shtovba. – Текст : непосредственный // Cybernetics and Systems Analysis. – 2006. – Volume 42, № 2. – P. 176–182.
5. Ishibuchi, H. Classification and modeling with linguistic information granules: advanced approaches advanced approaches to linguistic data mining / H. Ishibuchi, T. Nakashima, M. Nii. – Berlin – Heidelberg : Springer-Verlag, 2005. – 135 p. – Текст : непосредственный.

Получена 08.10.2022

Принята 28.10.2022

В. М. РАДІОНЕНКО

ПРО ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ НЕЧІТКИХ УЗАГАЛЬНЕНИХ  
КРИТЕРІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЯКОСТІ НАВКОЛИШНЬОГО  
СЕРЕДОВИЩА НА ПРИКЛАДІ ТЕПЛОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ  
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** У статті розглянуто питання про можливе використання моделей невизначеності для визначення якості навколошнього природного середовища. Проаналізовано практичні моделі невизначеності, які не пов'язані з концепцією випадковості, а відображають неповноту наших знань про досліджуваний об'єкт і його взаємодію з навколошнім середовищем. На підставі проведеного аналізу запропоновано розглянути гнучку модель пошуку узагальненого критерію якості навколошнього природного середовища, яка базується на багатокритеріальній природі процесу прийняття рішення та зменшенні невизначеності, що виникає у випадку конфлікту та нечіткості цілей за наявності багатьох локальних критеріїв. Для більш чіткого і зваженого вирішення поставленого завдання обґрунтовано застосування концепції оптимальності по Парето. В результаті, запропонований нечіткий узагальнений критерій визначення якості навколошнього природного середовища здатний агрегувати безліч показників різної природи впливу і служить певною мірою для аналізу функціонування теплоелектростанцій.

**Ключові слова:** теплоелектростанція, якість середовища, критерій якості, модель невизначеності, вектор, параметри, функція приналежності.

VITALY RADIONENKO

ON THE PROSPECTS FOR THE USE OF FUZZY GENERALIZED CRITERIA  
FOR DETERMINING THE QUALITY OF THE ENVIRONMENT ON THE  
EXAMPLE OF THERMAL POWER PLANTS

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** The article discusses the possible use of uncertainty models to determine the quality of the environment. Practical models of uncertainty are analyzed, which are not related to the concept of randomness, but reflect the incompleteness of our knowledge about the object under study and its interaction with the environment. Based on the analysis, it is proposed to consider a flexible model for searching for a generalized criterion of environmental quality, which is based on the multi-criteria nature of the decision-making process and reducing the uncertainty that arises in the presence of conflict and the vagueness of goals in the presence of many local criteria. To solve the problem of finding a generalized criterion for environmental quality, it is proposed to consider it as a problem of fuzzy nonlinear programming with incompatible criteria, control variables and nonlinear constraints. For a clearer and more balanced solution of the task, the application of the Pareto optimality concept is justified. As a result, the proposed fuzzy generalized criterion for determining the quality of the natural environment is able to aggregate many indicators of different nature of the impact and serves as a certain measure of the analysis of the functioning of thermal power plants.

**Key words:** thermal power plant, environmental quality, quality criterion, uncertainty model, vector, parameters, membership function.

**Радионенко Виталий Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры техносферной безопасности ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: переработка и повторное использование промышленных отходов.

**Радіоненко Віталій Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри техносферної безпеки ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: переробка і повторне використання промислових відходів

**Radionenko Vitaly** – Ph. D. (Eng), Associate Professor, Technosphere Safety Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: recycling and reuse of industrial waste.

EDN: FRWBFV

УДК 66.048

**З. В. УДОВИЧЕНКО, Д. В. САВИЧ, В. П. ДЕМЕШКИН**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **ОЧИСТКА И УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЫ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ В АППАРАТАХ С ЗЕРНИСТЫМ СЛОЕМ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Аннотация.** В статье акцентируется внимание на решение вопроса повышения энергосбережения отрасли строительного производства за счет одновременной очистки и утилизации теплоты отходящих газов оборудования. Среди методов и средств решения таких вопросов важное место занимают сухие способы очистки газов с помощью фильтров со стационарными и движущимися зернистыми слоями. Приведены основные характеристики зернистого материала и эффективность его использования в качестве промежуточного теплоносителя. Рассмотрены известные зернистые аппараты для очистки и одновременной утилизации теплоты отходящих газов. Предложены варианты установки трубчатых теплообменных аппаратов в толще зернистого материала с указанием достоинств и недостатков каждого из вариантов. Представлены экспериментальные данные установки зернистого фильтра с компоновкой в толще зернистого материала тепловых труб, по которым можно судить о возможности и эффективности утилизации теплоты отходящих газов совместно с их очисткой [1]. Даны основные выводы об эффективности и целесообразности применения комплексного метода очистки и утилизации теплоты отходящих газов оборудования строительного производства.

**Ключевые слова:** зернистый слой, утилизация теплоты, очистка, тепловые трубы, теплообменный аппарат, отходящие газы.

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Одной из важнейших научно-технических проблем является энергосбережение и охрана окружающей среды от газообразных выбросов, выделяемых при сгорании твердого, жидкого и газообразного топлива. Экономия топливно-энергетических ресурсов и создание малоотходных технологий при эксплуатации промышленных установок приобретает в настоящее время особую актуальность.

Повышение эффективности работы и экологической безопасности установок за счет применения комплексных систем утилизации теплоты и адсорбционной очистки уходящих газов с последующим использованием уловленных загрязняющих веществ и теплоты является актуальнейшей задачей, решение которой позволит создавать эффективные тепловые схемы и компактные технические решения.

Если по проектированию теплоутилизационных аппаратов исследования разрознены и требуют обобщения в отечественной и зарубежной практике конструирования перечисленных устройств, то по разработке комплексных теплоутилизаторов-адсорбёров решение находится на начальном уровне и нуждается в тщательной проработке.

### **ЦЕЛЬ**

Анализ известных аппаратов для комплексной утилизации теплоты и адсорбционной очистки отходящих газов в аппаратах с зернистым слоем.



## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Использование теплоты отходящих газов строительного производства представляет собой сложную техническую задачу, для решения которой необходим комплексный подход, сочетающий очистку газов и утилизацию теплоты.

Производство огнеупорных материалов является одним из основных объектов строительной промышленности, на долю которого приходятся существенные объемы выбросов вредных веществ, что пагубно сказывается на здоровье людей.

Отрицательное влияние пылей производства строительных материалов и огнеупоров на человека определяется суммарным токсикологическим воздействием этих пылей на различные органы. Наибольшему влиянию пыли подвержены органы дыхания, в меньшей степени – кожа, глаза, кровь и пищеварительный тракт. При вдыхании пылей огнеупорного производства возникают пневмокониозы, связанные с отложением пыли в легких и реакцией ткани на ее присутствие [2].

Несмотря на то, что за последние годы на предприятиях производства огнеупоров проведены значительные работы по газоочистке (установлены электрофильтры, группы циклонов, рукавные фильтры и группы из них), суммарные выбросы пыли продолжают оставаться высокими [3, 4].

В настоящее время себя положительно зарекомендовали аппараты очистки из сыпучих зернистых материалов. В зернистых насыпных фильтрах задерживающие частицы не связаны между собой. Материал фильтрующего слоя подбирают по необходимой механической и химической стойкости, доступности материала. Они позволяют работать с токсичными агрессивными и со слипающимися пылями. В настоящее время в качестве заполнителя используется сырье (периклаз, шамотный бой, кварцевый песок), возвращаемое вместе с уловленной пылью в технологический процесс.

Фильтрующий материал готовится дроблением и сепарацией для получения требуемых фракций. В большинстве случаев при фильтровании сыпучие материалы неподвижны и частицы пыли осаждаются внутри насыпного слоя. Образование пылевых отложений внутри зернистого слоя обеспечивает его пылеемкость и способствует резкому повышению эффективности пылеулавливания. Фильтрование через пористые слои со связанный структурой отличается высоким перепадом давления и трудностью регенерации.

Слои из зерен неправильной формы обычно более эффективны, чем слои из сферических или окатанных зерен. Зернистым слоям различных типов свойственны единые гидродинамические и кинетические закономерности разделения гетерогенных систем с дисперсной фазой.

Зернистые насыпные слои отличаются искривленными продольными и поперечными каналами с переменной и нерегулярной площадью и формой сечения. В широком диапазоне происходит изменение размера пор под действием различных механизмов осаждения частиц. Промышленная пыль состоит из частиц, имеющих неправильную, шероховатую геометрическую форму, и обычно является полидисперсной системой. Поэтому наибольшее распространение в огнеупорной промышленности получили фильтры с зернистыми слоями.

Наряду с выбросами на производстве имеется значительный потенциал ВЭР [3–4].

Рациональное использование теплоты ВЭР не ограничивается только экономией топлива, а этим материальных и трудовых затрат, а оказывает определенное влияние на улучшение теплового баланса предприятия района, города технико-экономические показатели систем теплоснабжения [5].

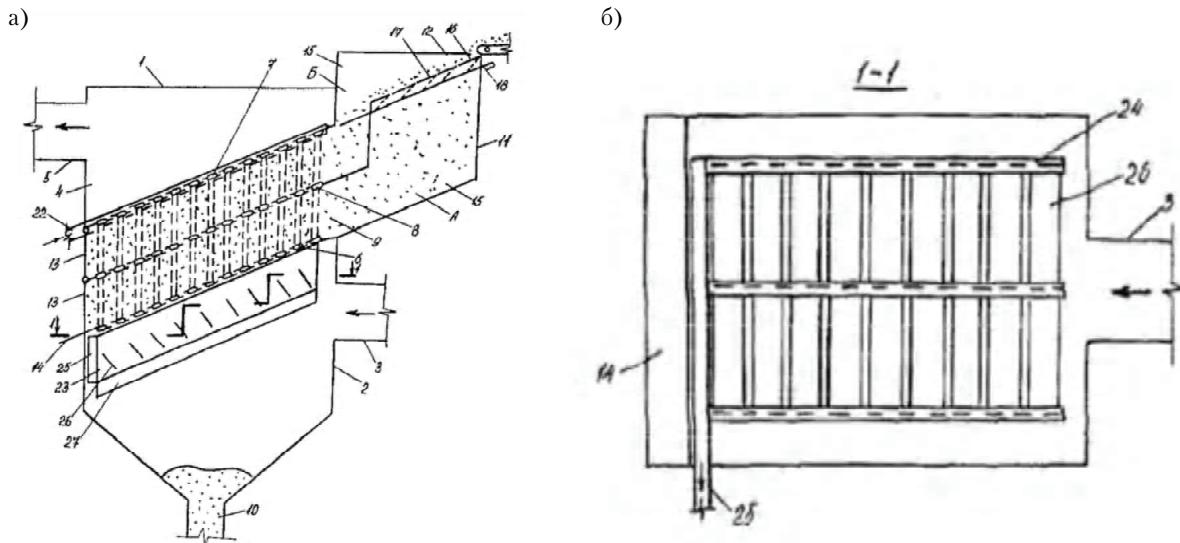
При наличии значительных ВЭР в производстве огнеупоров имеет место разработка перспективных технологий по очистке с одновременной утилизацией сбросного тепла отходящих газов огнеупорного производства.

Большое многообразие видов и конструкций газоочистных и теплоутилизационных устройств обусловлено широким спектром задач и областей их применения [6]. Множество методов и способов утилизации выбросной теплоты и очистки уходящих газов основаны на различных технических и конструктивных решениях.

Рассмотрим известные конструкции зернистых фильтров с одновременной очисткой и утилизацией тепла отходящих газов.

На рисунке 1 приведена конструкция фильтра [7] для очистки загрязненных газов от пыли, в частности от пыли предприятий строительных материалов. Конструкция устройства предусматривает также утилизацию теплоты очищаемых газов.

Фильтр позволяет повысить степень очистки загрязненных газов при снижении эксплуатационных затрат за счет поддержания влажного состояния зернистого материала, способствующего более активному налипанию пыли, и создания двухслойевой насадки с крупными и мелкими зернами, обеспечивающей снижение аэродинамического сопротивления и увеличение продолжительности непод-



**Рисунок 1 – Зернистый фильтр:** а) конструкция; б) разрез 1–1; 1 – корпус; 2 – камера загрязненного газа; 3 – входной патрубок; 4 – камера очищенного газа с выходным патрубком – 5; 6 – жалюзийная решетка в камере загрязненного газа; 7 – основная жалюзийная решетка; 8 – дополнительная жалюзийная решетка; 9 – слой зернистого материала. 10 – разгрузитель для удаления осевших частиц; 11 – бункер; 12 – загрузочное окно для зернистого материала; 13 – откидные крышки; 14 – направляющая для удаления зернистого материала после насыщения пылью; 15 – нижнее и верхнее отделение; 16 – решетка; 17 – консольные платины; 18 – заслонка; 19 – канал для входа теплоносителя; 20 – трубы с отбойными ребрами волнообразной формы – 21; 22 – коллектор для подвода теплоносителя; 23 – коллектор для отвода теплоносителя; 24 – плоские каналы; 25 – патрубок для выхода теплоносителя; 26 – направляющие пластины коллектора; 27 – вертикальное ребро.

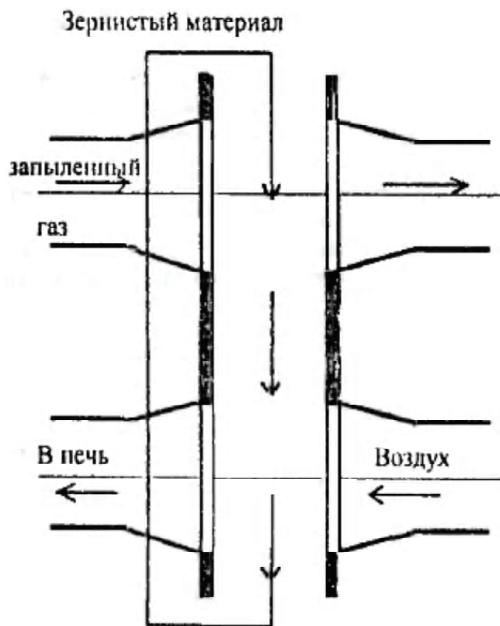
вижного режима ее работы в аппарате. Повышение эффективности утилизации теплоты очищаемого газа достигается при использовании жалюзийных решеток в качестве поверхности теплообмена наряду с погруженными в слой трубами, соединяющими полости жалюзей. Это делает возможным получение высокой температуры теплоносителя на выходе из фильтра [5].

На рисунке 2 представлен зернистый фильтр для возможности фильтрации высокотемпературного газа (до 600...700 °C). Жалюзийные решетки оборудуют водоохлаждаемыми трубами или выполняют в виде трубчатых водоохлаждаемых панелей. Механизм осаждения пыли в зернистых фильтрах представляет собой сочетание касания, зацепления, отсеивания, гравитации, инерции и электростатики.



**Рисунок 2 – Зернистый фильтр с водоохлаждающими трубами.**

На рисунке 3 представлена одна из характерных схем конструкции аппарата с подвижным зернистым слоем [8]. Он состоит из двух камер, расположенных одна над другой и загруженных зернистым материалом со средним диаметром 4...6 мм. Слой промежуточного теплоносителя промывается и верхней камере горячими газами, а в нижнем воздухом. Нагретый теплоноситель из верхней камеры через специальное устройство поступает в нижнюю камеру, а оттуда, уже охлажденный, подается в верхнюю камеру специальным подъемником. Движение газа и зернистого материала в каждой камере перекрестное. Нижний предел конечной температуры лимитирован условием предотвращения конденсации водяных паров.



**Рисунок 3 – Фильтр-регенератор с промежуточным теплоносителем в виде зернистого материала.**

Использование воздухонагревателя с подвижным зернистым слоем дает возможность утилизировать около 10 % теплоты, теряемой с уходящими газами печи. Наиболее полное использование большей части теплоты требует установки дополнительных устройств, например рекуперативных теплообменников.

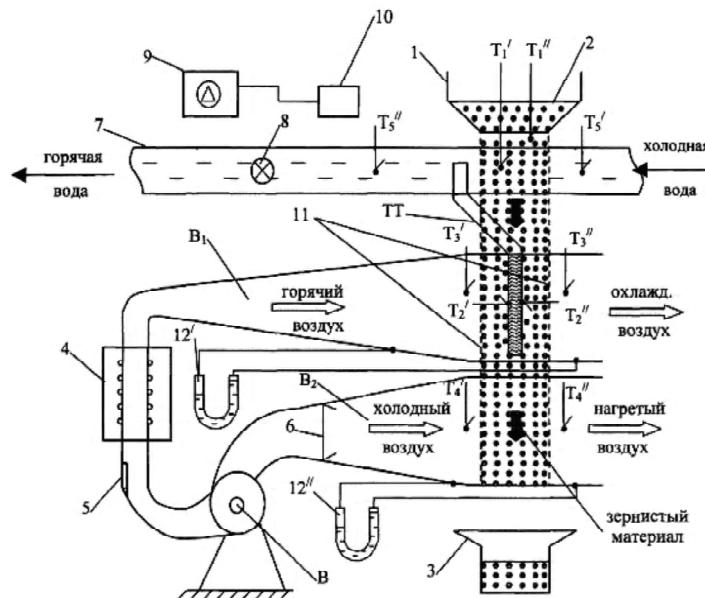
С целью определения возможности очистки газов и использования остаточной их энталпии для производственных целей, отопления и горячего водоснабжения были исследованы три варианта установки теплоутилизационного оборудования. Данные приведены в таблице 1.

**Таблица 1 – Варианты установки теплоутилизационного оборудования в толще зернистого материала**

Варианты установки	Место установки ТА	Достоинства	Недостатки
Первый вариант	Непосредственно в слое зернистого материала (либо в верхней части аппарата либо как в верхней, так и в нижней частях)	Малое загрязнение труб пылевыми отложениями, минимальные потери теплоты	Значительное увеличение габаритных размеров фильтра и его гидравлического сопротивления
Второй вариант	В слое зернистого материала, прошедшего обе части фильтра	Есть возможность утилизировать часть теплоты	Низкая теплопроводность, возможное спекание зерен, увеличение габаритных размеров
Третий вариант	В газоходе за верхней частью зернистого фильтра	Тепловая мощность достигает 1 100 кВт, возможность получать горячую воду	Увеличение габаритных размеров

Оценивая приведенные схемы утилизации теплоты дымовых газов при помощи теплообменников с зернистыми материалами, установлено, что наибольшее количество утилизированной теплоты в виде горячей воды можно получить при использовании схемы фильтра с теплообменником в газоходе за верхней частью зернистого фильтра, то есть третий вариант.

На базе ГОУ ВПО Воронежского государственного архитектурно-строительного университета С. А. Григорьевым [1] была собрана экспериментальная установка для исследования теплообмена в перекрестно продуваемом движущемся плотном зернистом слое с тепловыми трубами, расположеннымными в его толще. Установка приведена на рисунке 4.



**Рисунок 4 – Общая схема экспериментальной установки:** 1 – загрузочный бункер; 2 – движущийся зернистый слой; 3 – приёмный бункер с шиберным устройством; 4 – трубчатая электрическая печь; 5 – ротаметр; 6 – счетчик-расходомер виброакустический СВА; 7 – коллектор с холодной водой; 8 – водяной счетчик; 9 – многоточечный переключатель термопар; 10 – потенциометр; 11 – заградительная сетка; 12, 12'' – U-образные манометры; В – вентилятор; В1, В2 – нагнетательные воздуховоды; Т1' – Т5', Т1'' – Т5'' – термопары; ТТ – тепловые трубы.

В эксперименте проводилось сравнение эффективности утилизации теплоты (нагревом воды в коллекторе 7) с установкой тепловых труб в толще зернистого материала и без него. Экспериментальные данные приведены в таблице 2.

**Таблица 2 – Температура воды в коллекторе**

	Расход воды, м <sup>3</sup> /ч			
	20	2	1	0,5
Температура Т5'', °С – в опыте без зернистого слоя	21	38,2	56,6	84,2
– в опыте с зернистым слоем	22	39,3	58	86

Увеличение (хотя и незначительное) температуры воды в коллекторе за тепловыми трубами при наличии зернистого слоя можно объяснить различными механизмами теплопередачи. В отсутствие зернистого слоя происходит конвективный теплообмен между дымовыми газами и тепловыми трубами, при наличии зернистого слоя превалирует кондуктивная теплопроводность от более равномерно нагретого газами зернистого материала к стенкам тепловых труб.

## ВЫВОДЫ

Выполнен обзор известных аппаратов с зернистым слоем для очистки и одновременной утилизацией теплоты отходящих газов. Изучены основные характеристики зернистого материала и эффективность его использования в качестве промежуточного слоя для утилизации теплоты и очистки отходящих газов. Рассмотрены варианты установки трубчатых теплообменных аппаратов в толще зернистого материала с движущимся слоем, представлены экспериментальные данные установки зернистого фильтра с компоновкой в толще зернистого материала тепловых труб, которые свидетельствуют о возможности применения комплексных схем для утилизации теплоты с одновременной очисткой уходящих газов промышленности строительных материалов. Теплоутилизаторы-адсорбера со слоем твердого зернистого теплоносителя с установкой в его толще теплообменных трубчатых аппаратов перспективны при использовании их для утилизации теплоты с одновременной адсорбционной очисткой уходящих газов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев, С. А. Совершенствование метода комплексной утилизации теплоты и адсорбционной очистки токсичных газов теплогенерирующих установок : специальность 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Григорьев Сергей Александрович ; Воронежский государственный архитектурно-строительный университет. – Воронеж, 2006. – 133 с. – Библиограф.: 122–130. – Текст : непосредственный.
2. Красовицкий, Ю. В. Медико-экологический мониторинг и токсикология пыли огнеупорного производства / Ю. В. Красовицкий, Е. В. Архангельская. – Текст : непосредственный // Новые огнеупоры. – 2003. – Выпуск № 5. Экология. – С. 53–56.
3. Савич, Д. В. Очистка и утилизация дымовых газов на Часовоярском огнеупорном комбинате / Д. В. Савич. – Текст : непосредственный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2013. – Выпуск 2013-5(103) Инженерные системы и техногенная безопасность. – С. 36–40.
4. Выборнов, Д. В. Анализ теплового потенциала уходящих газов производства огнеупорной промышленности / Д. В. Выборнов, Б. В. Кляус, Д. В. Савич. – Текст : электронный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2017. – Выпуск 2017-5(127) Инженерные системы и техногенная безопасность. – С. 44–49. – URL: [http://donnasa.ru/publish\\_house/journals/vestnik/2017/vestnik\\_2017-5\(127\).pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2017/vestnik_2017-5(127).pdf) (дата публикации: 20.11.2017).
5. Комплексное энергетехнологическое использование газа и охрана воздушного бассейна / Е. Е. Новгородский, В. А. Широков, Б. В. Шанин [и др.]. – Москва : Дело, 1997. – 368 с. – ISBN 5-7749-0056-8. – Текст : непосредственный.
6. Агапов, Ю. Н. Использование теплообменных аппаратов для утилизации и регенерации теплоты низкопотенциальных отходящих газов / Ю. Н. Агапов, А. В. Тараков, А. В. Санников. – Текст : непосредственный // Научно-технический прогресс в области совершенствования тепловых процессов и новых технологий промышленных установок и ТЭЦ : материалы Всесоюзной научно-технической конференции, Челябинск, 1987. – Челябинск, 1987. – С. 33–35.
7. Патент № 2 116 117 С1 Российской Федерации, МПК B01D 46/30(2006.01). Зернистый фильтр : № 96100088/25 : заявлено 01.03.1996 : опубл. 27.07.1998 / Щукина Т. В. ; заявитель Воронежская государственная строительная академия. – 7 с. – Текст : непосредственный.
8. Удовиченко, З. В. Использование зернистых теплоносителей для утилизации теплоты отходящих газов стекольного производства / З. В. Удовиченко, В. Ф. Губарь. – Текст : непосредственный // Труды молодых ученых. – в 2 частях ; часть 2. – Санкт – Петербург : [б. и.], 1999. – С. 121–125.

Получена 29.09.2022

Принята 28.10.2022

З. В. УДОВИЧЕНКО, Д. В. САВІЧ, В. П. ДЕМЕШКІН  
ОЧИЩЕННЯ ТА УТИЛІЗАЦІЯ ТЕПЛОТИ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ В АПАРАТАХ  
ІЗ ЗЕРНИСТИМ ШАРОМ У ПРОМИСЛОВОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ  
МАТЕРІАЛІВ  
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** У статті акцентується увага на вирішенні питання підвищення енергозбереження в галузі будівельного виробництва за рахунок одночасного очищення та утилізації теплоти відхідних газів обладнання. Серед методів і засобів вирішення таких питань важливе місце займають сухі способи очищення газів за допомогою фільтрів зі стаціонарними і зернистими шарами, що рухаються. Наведено основні характеристики зернистого матеріалу та ефективність його використання як проміжного теплоносія. Розглянуто відомі зернисті апарати для очищення та одночасної утилізації теплоти газів, що відходять. Запропоновано варіанти встановлення трубчастих теплообмінних апаратів у товщі зернистого матеріалу із зазначенням переваг та недоліків кожного з варіантів. Представлені експериментальні дані установки зернистого фільтра з компонуванням в товщі зернистого матеріалу теплових труб, за даними яких можна судити про можливість та ефективність утилізації теплоти газів, що відходять, спільно з їх очищенням [1]. Дано основні висновки щодо ефективності та доцільності застосування комплексного методу очищення та утилізації теплоти відхідних газів обладнання будівельного виробництва.

**Ключові слова:** зернистий шар, утилізація теплоти, очищення, теплові труби, теплообмінний апарат, гази, що відходять.

ZLATA UDOVICHENKO, DARYA SAVICH, VALENTIN DEMESHKIN  
PURIFICATION AND UTILIZATION OF THE HEAT OF EXHAUST GASES IN  
APPARATUSSES WITH A GRANULAR BED IN THE BUILDING MATERIALS  
INDUSTRY

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** The article focuses on the solution of the issue of increasing the energy saving of the construction industry due to the simultaneous purification and utilization of the heat of the exhaust gases of the equipment. Among the methods and means of solving such problems, an important place is occupied by dry methods of gas purification using filters with stationary and moving granular layers. The main characteristics of the granular material and the efficiency of its use as an intermediate coolant are given. The well-known granular devices for cleaning and simultaneous utilization of the heat of exhaust gases are considered. Options for installing tubular heat exchangers in the thickness of a granular material are proposed, indicating the advantages and disadvantages of each of the options. Experimental data are presented for a granular filter installation with a layout with a thicker granular material of heat pipes, according to which one can judge the possibility and efficiency of waste gas heat recovery together with their purification [1]. The main conclusions about the effectiveness and expediency of using an integrated method for cleaning and utilizing the heat of waste gases from building production equipment are given.

**Key words:** granular layer, heat recovery, purification, heat pipes, heat exchanger, exhaust gases.

**Удовиченко Злата Вікторовна** – кандидат техніческих наук, доцент кафедри теплотехники, теплогазоснабження і вентиляції ГОУ ВПО «Донбасська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергозбереження в системах теплогазоснабження і вентиляції.

**Савич Дар'я Владиславівна** – асистент кафедри теплотехники, теплогазоснабження і вентиляції ГОУ ВПО «Донбасська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергозбереження в системах теплогазоснабження і вентиляції.

**Демешкін Валентин Павлович** – старший преподаватель кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергосбережение в системах теплогазоснабжения и вентиляции.

**Удовиченко Злата Вікторівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергозбереження в системах теплогазопостачання і вентиляції.

**Савіч Дар'я Володимирівна** – асистент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергозбереження в системах теплогазопостачання і вентиляції.

**Демешкін Валентин Павлович** – старший викладач кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергозбереження у системах теплогазопостачання та вентиляції.

**Udovichenko Zlata** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: heatsaving in systems of a heat-gassupply and ventilation.

**Savich Darya** – assistant, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: heatsaving in systems of a heat-gassupply and ventilation.

**Demeshkin Valentin** – Senior Lecturer, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: energy saving in heat and gas supply and ventilation systems.

EDN: HDYNWJ

УДК 628.144

**Г. С. ТУРЧИНА**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ВОДОПРОВОДНОЙ СЕТИ ПУТЕМ  
РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ**

**Аннотация.** Согласно нормативным документам [3, 4], снижение количества подаваемой воды не должно быть более 30 % от расчетного на протяжении временного промежутка, зависящего от категории города. С увеличением срока эксплуатации отказы водопроводной сети происходят чаще, бывают случаи, когда сложность аварийной ситуации влечет за собой полное прекращение подачи воды по отдельным трубопроводам из-за конфигурации сети. При каждой аварии появляются экономические издержки не только на ремонт, но и от сопутствующих убытков из-за вынужденного снижения воды, поставляемой абонентам. В связи с этим в статье рассмотрены вопросы резервирования сети водоснабжения путем заложения дополнительного сечения трубопроводов и с помощью создания дополнительных колец на сети. Стоит отметить, что оба способа несут дополнительные затраты ресурсов и применять их необходимо из условий баланса между капитальными затратами и снижением рисков от потерь во время эксплуатации сети благодаря повышению ее надежности за счет резервирования.

**Ключевые слова:** водопроводная сеть, надежность, диаметры трубопроводов, расход воды.

Существует необходимость в определении направления развития и совершенствования проектной документации, связанной с надежностью систем водоснабжения. Данные вопросы решаются на правительственном уровне через ряд постановлений и законов [1, 2, 3]. Суть данных требований регламентирует необходимость определения параметров надежности как эксплуатируемых, так и проектируемых объектов водного хозяйства. В [4] п. 7.4 нормирована продолжительность полного прекращения подачи воды или сокращенной подачи воды. Эти величины могут считаться аналогами качества функционирования систем водоснабжения. И все же, если изучить нормативную документацию, можно заметить чрезвычайно малое количество сведений по теме оценки надежности кольцевых сетей водоснабжения.

Помимо оценки состояния сети, необходимо искать пути повышения ее надежности. Одними из них возможно рассмотреть резервирование сети дополнительными кольцами и увеличением полезного сечения трубопроводов.

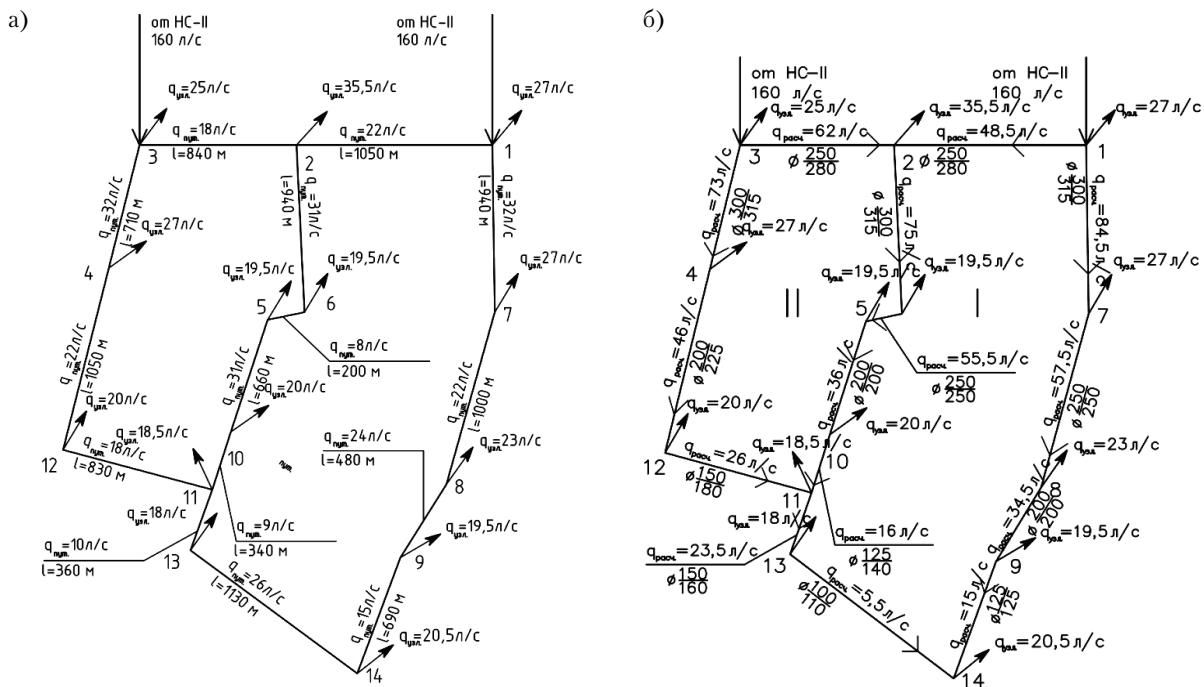
Согласно [4], отказом участка можно считать подачу воды меньше 70 % от расчетного. При этом кольцевые сети водоснабжения могут передать недостающий объем жидкости через смежные участки. Важным в данном случае является определить количество воды, которое возможно передать через такие трубопроводы в обход аварийного.

Рассмотрим на примере сети водоснабжения, состоящей из двух колец (рисунок 1).

Необходимо определить, сколько воды потребуется транспортировать через другие участки для обеспечения требуемого расхода жидкости. Это значение будет зависеть также и от количества аварийных участков. Например при работоспособности всех участков, расчетные расходы в сети будут иметь следующий вид (рисунок 1). В случае отключения одного участка возможны следующие ситуации (рисунок 2), а при авариях на двух участках, необходимость передачи через смежные участки большего количества жидкости резко возрастает.

На рисунке 2 заметно резкое увеличение расхода для пропуска всего требуемого количества воды при транзите к другим трубопроводам в обход аварийного. Еще более заметно увеличение необходимого расчетного расхода через смежные трубопроводы в случае отказа одновременно двух участков.





**Рисунок 1 – Сеть водоснабжения из двух колец: а) с длинами трубопроводов, узловыми и путевыми расходами; б) с расчетными расходами и диаметрами участков (над чертой – из чугуна, под чертой – из пластика).**

Частично данную проблему решает наличие дополнительных уличных линий, соединяющих между собой участки магистральной сети, однако предполагается, со временем город будет расти, и дефицит пропускной способности будет все сложнее компенсировать прокладкой уличных трубопроводов.

Естественно, структурное строение сети, количество колец, живое сечение труб – все это оказывает значительное влияние на надежность сети в целом. Логично будет предположить, что оценка степени влияния всех вышеназванных качеств позволит определить наиболее «слабые» места в сети и выбрать сбалансированное решение между затраченными средствами и снижением уязвимости системы [4, 5]. Как отмечали исследователи в своей работе, большее значение в подобной оценке появится, если рассматриваются «сравнения различных проектных решений» [6].

По понятным причинам, в случае аварии на некоторых участках подать необходимое количество воды в объеме не менее 70 % от расчетного через смежные участки может быть невозможно вследствие недостаточной пропускной способности трубопроводов, по которым транспортируется жидкость в обход аварийного участка. Например, глядя на рисунки 1 «б» и 2 «г», можно понять, что при аварии на участке 3–4 для транзита через участок 11–12 на трубопроводы 4–12 будет не хватать воды для нормальной подачи, т. к. диаметр на предшествующем участке 11–12 будет недостаточным для этого. А для транзита на участок 7–8 (рисунки 1 «б» и 2 «г») при поломке на участке 1м7 будет недостаточная пропускная способность на участках 8–9, 9–14, 13–14 и 11–12. Таким образом теряется возможность вместить недостаточную подачу воды из-за аварии в необходимом объеме даже при наличии резервирования в виде колец. Это происходит из-за того, что обеспечить транзит необходимого количества жидкости будет невозможно ввиду недостаточной пропускной способности предшествующих трубопроводов, по которым, предположительно, будет перемещаться жидкость в обход аварийного участка.

Во избежание подобного при замене устаревшего трубопровода или новом проектировании возможно делать поправку на увеличение диаметра труб в разумных пределах. Это поможет обеспечивать заданные функции забора воды из системы и ее дальнейшего транзита по сети не ниже необходимого количества в случае отказа отдельных трубопроводов.

В случае аварии на одном из участков вполне возможно временное снижение расхода на участках, зависимых от аварийного трубопровода, до 70 % от изначального расчетного расхода.

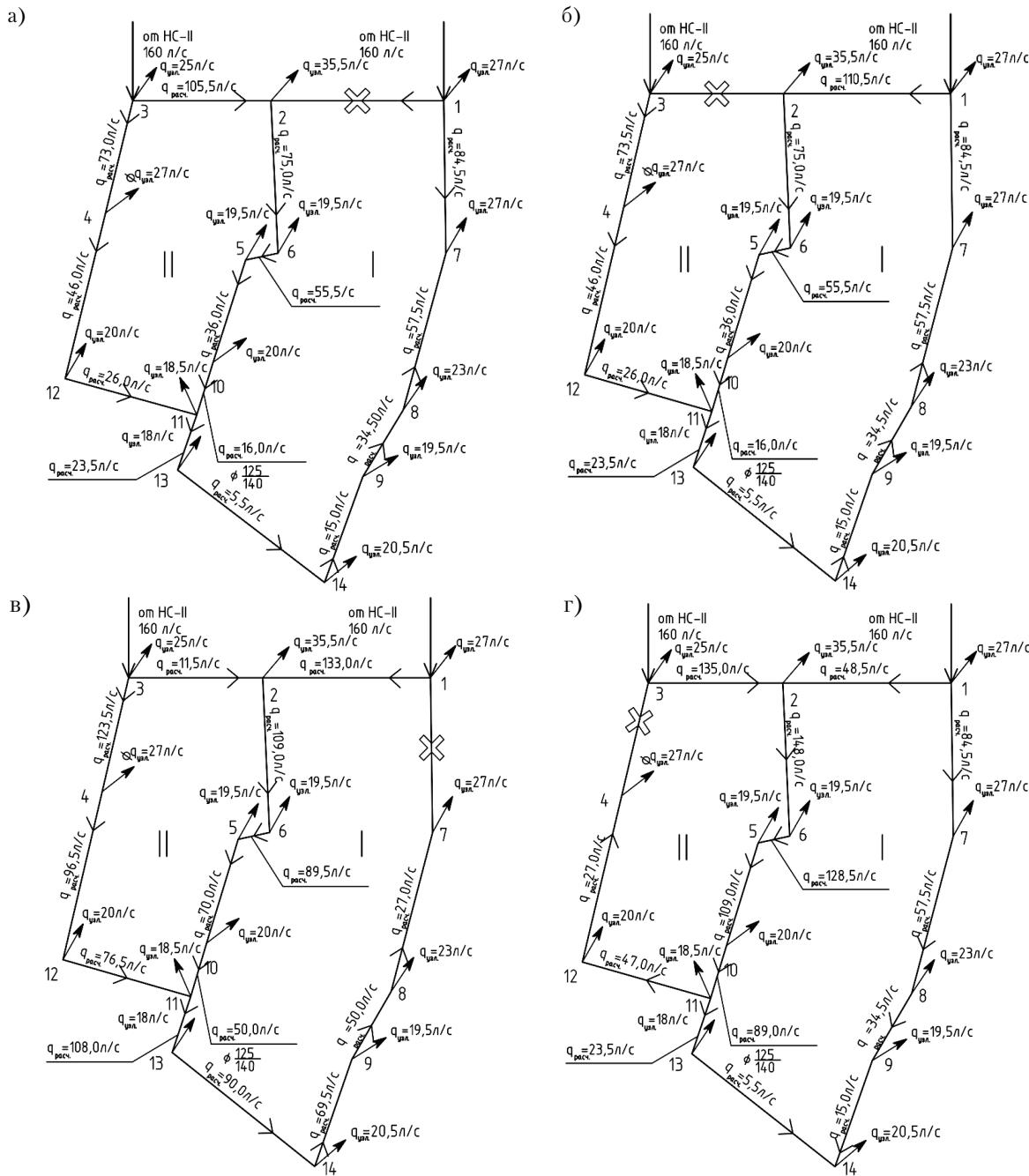


Рисунок 2 – Распределение расхода воды в сети: в случае аварии на участках: а) 1–2; б) 2–3; в) 1–7; г) 2–6.

Для системы на рисунке 1 возможно предусмотреть дополнительную пропускную способность трубопроводов для транзита недостающего количества жидкости через другие участки. Это позволит более эффективно предотвращать снижение количества подаваемой воды из-за отключения отдельного трубопровода для всей сети. К тому же предусмотренный резерв полезного сечения труб сможет обеспечивать дополнительный расход жидкости в условиях постоянного увеличения плотности населения и расширяющегося города, а следовательно, и количества потребляемой воды на перспективу.

Таким образом, для определения диаметров трубопроводов системы на рисунке 1, исходя из возможного понижения расхода на участках сети на 70 % от расчетного, можно предусмотреть следующие расходы

$$q_{2-3} = q_{3-4} = 0,7 \cdot (160 - 25) = 94,5 \text{ л/с}, \quad (1)$$

$$q_{l-7} = q_{l-2} = 0,7 \cdot (160 - 27) = 93,1 \text{ л/с}, \quad (2)$$

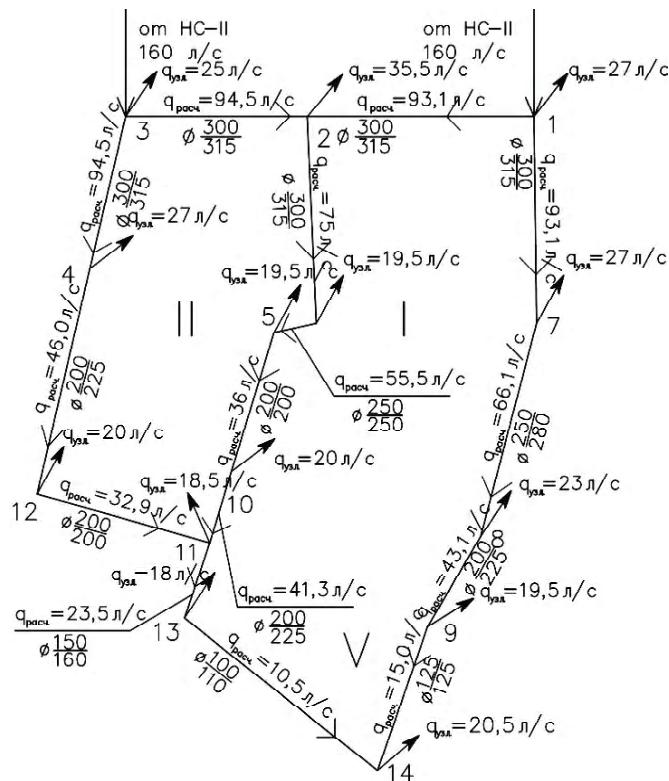
где 27 и 25 – расход в узлах 1 и 3,

160 – расход из водовода, подающего воду в сеть,

0,7 – означает, что при поломке одного из прилегающих к водоводу участку по смежному необходимо подать количество воды не менее 70 % от запроектированного для обеспечения нормального режима водопотребления.

Зачастую для определения диаметров трубопроводов с учетом дополнительного резервирования сечения достаточно просчитать необходимый расход воды на участках, находящихся вблизи водоводов, в обход условно аварийного трубопровода, а затем, отталкиваясь от ситуаций, когда один из этих участков будет отключен, дополнительно найти расходы жидкости по пути к отключенным участкам через предыдущие трубопроводы.

Подобным образом можно получить следующее распределение расходов по сети и подобрать на основании него диаметры трубопроводов (рисунок 3).



**Рисунок 3 – Сеть водоснабжения из двух колец с дополнительным резервированием пропускной способности трубопроводов.**

Для новых систем будет полезно учесть дополнительное резервирование полезного сечения не только для бесперебойной подачи воды в сеть во время аварии каким-либо из трубопроводов, но и с учетом роста численности потребителей в будущем. В отличие от проектирующихся новых сетей для существующих сетей расчет по такому способу технически более сложен ввиду целого ряда влияющих факторов. Со временем внутренний диаметр труб может уменьшаться, дополнительные подключения на сети и многое другое со временем оказывает все большее влияние на изменение количества жидкости, пропускаемой через трубопровод. К тому же с длительностью срока эксплуатации ухудшается общее состояние сети. Похожая ситуация наблюдается во многих городах России [8, 9, 10].

Несмотря на то, что в некоторых случаях население может не ощущать последствия сильного износа сети города [11], состояние последних сказывается на количестве ремонтно-восстановительных работ, следовательно, и на затратах средств для поддержания системы в работоспособном состоянии. К тому же на трубопроводах большего диаметра значительно ниже показатели аварийности.

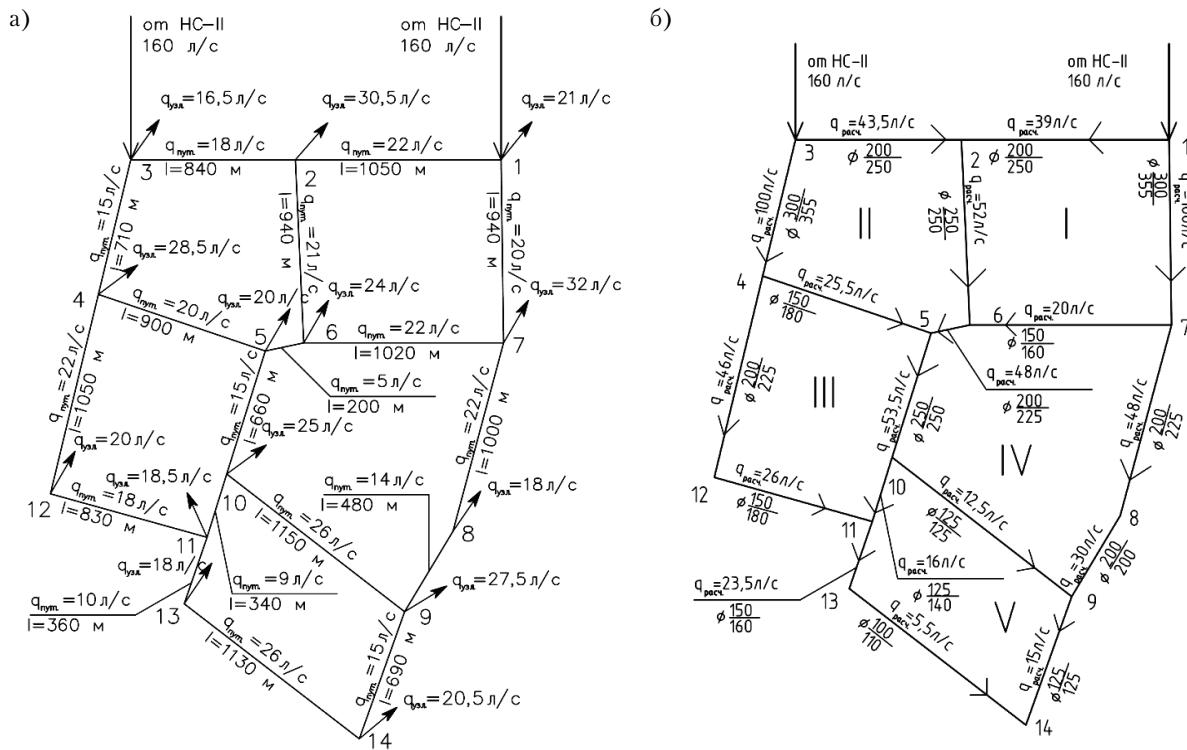
Например, при обследовании аварий на водопроводной сети Центрального района г. Макеевки, протяженностью 257 км, за 4 года эксплуатации было выявлено 4 920 отказов, 3 552 из них приходится на линейную часть сети (таблица).

**Таблица** – Распределение числа повреждений по материалам и диаметрам труб

Диаметры труб, мм	Количество повреждений по материалам труб, шт.			Всего отказов
	Сталь	Чугун	Полимер	
До 50	415	44	36	495
63–100	1 113	187	84	1 384
110–200	924	154	19	1 197
250–300	272	27	–	299
400–500	103	5	–	108
600–700	48	9	–	57
800–1 000	12	–	–	12
Итого	2 887	526	139	3 552

Прослеживается закономерность в распределении отказов по диаметрам (таблица): чем меньше диаметр – тем больше число аварий на трубопроводах. К тому же некоторые виды санации проще проводить на участках труб, имевших больший диаметр.

Для сети на рисунке 1 можно рассмотреть возможность повышения надежности через увеличение количества колец. Дополнительный постоянно нагруженный резерв за счет увеличения числа колец может дать следующий результат (рисунок 4). Для сети с измененной конфигурацией были подобраны новые диаметры трубопроводов. На рисунке 4 из значения приведены для чугунных (над чертой) и полиэтиленовых (под чертой) труб.



**Рисунок 4 – Схемы пятикольцевой водопроводной сети: а) с узловыми, путевыми расходами и длинами участков труб; б) с расчетными расходами и диаметрами трубопроводов.**

Пример нескольких вариантов конфигураций сети для одного и того же района позволяет рассмотреть влияние на надежность системы одновременно обоих параметров: резервирования пропускной способности трубопроводов и резервирования путем увеличения количества колец.

Исходя из условий надежности, диаметры труб подбираются таким образом, чтобы в случае отката одного из участков из каждого узла отводилось не менее 70 % расчетного расхода воды. Например, из узла 1 отводится

$$(160 - 21) \cdot 0,7(2-1) = 97,3, \quad (3)$$

где 2 – количество участков сети, выходящих из расчетного узла.

Полученное значение будет больше 39 л/с на участке 1–2 и меньше расчетного значения 100 л/с на участке 1–7, следовательно, принимается значение 97,3 л/с для участка 1–2 и оставляем 100 л/с для 1–7.

Аналогичным образом проводится расчет для других трубопроводов

$$\begin{aligned} (160 - 21) \cdot 0,7(2-1) &= 97,3, \\ q_{2-3} = q_{3-4} &= (160 - 16,5) \cdot 0,7 / 1 = 100,5 \text{ л/с}, \end{aligned} \quad (4)$$

100 л/с < 100,5 л/с, 43,5 л/с < 100,5 л/с, принимаем 100,5 л/с на участках 3–4 и 2–3.

$$q_{2-6} = (100,5 - 30,5) \cdot 0,7 / 1 = 49 \text{ л/с}, \quad (5)$$

49 л/с < 52 л/с, принимаем 52 л/с.

Для удаленных от водоводов участков значение расхода в скобках состоит из расхода узла и расхода примыкающих к узлу участков, по которым вода будет транспортироваться далее согласно схеме сети.

$$(32 + 48 + 20) \cdot 0,7 / 2 = 35 \text{ л/с}, \quad (6)$$

35 л/с < 48 л/с, принимаем 48 л/с на участке 5–6.

$$(28,5 + 25,5 + 46) \cdot 0,7 / 2 = 35 \text{ л/с}, \quad (7)$$

25,5 л/с < 35, 35 л/с < 46 л/с, принимаем 35 л/с для участка 4–5 и 46 л/с для 4–12 и, т. к. для выполнения требования к подачи воды не менее 70 % от проектной, на участке 11–12 будет

$$46 \cdot 0,7 = 32,2 \text{ л/с}, \quad (8)$$

$$(53,5 + 20) \cdot 0,7 / 2 = 25,7 \text{ л/с}, \quad (9)$$

25,7 л/с < 48 л/с, принимаем 48 л/с на трубопроводе 7м8.

На участке 8–9 будет

$$48 \cdot 0,7 = 33,6 \text{ л/с}, \quad (10)$$

$$(12,5 + 16 + 25) \cdot 0,7 / 2 = 18,7 \text{ л/с}, \quad (11)$$

$$(27,5 + 15) \cdot 0,7 / 2 = 14,9 \text{ л/с}, \quad (12)$$

14,9 л/с < 15 л/с, 14,9 < 18,7, принимаем 15 л/с на участке 9–14 и 18,7 л/с на 9–10.

$$(23,5 + 18,5) \cdot 0,7 / 2 = 14,5 \text{ л/с}, \quad (13)$$

14,5 л/с < 23,5 л/с, принимаем 23,5 л/с.

В общем виде специфику расчета можно поделить на 3 этапа:

- 1) определение подводящих трубопроводов, подключающихся к узлу, и расходов на этих участках;
- 2) определение возможности транзита необходимого количества жидкости по отводящим из узла трубопроводам, учитывая резервирование сети кольцами, по формуле

$$q_{\text{рез}} = (q_n - q_i) \cdot 0,7(n-1), \quad (14)$$

где  $q_n$  – расход воды на подводящем участке, л/с;

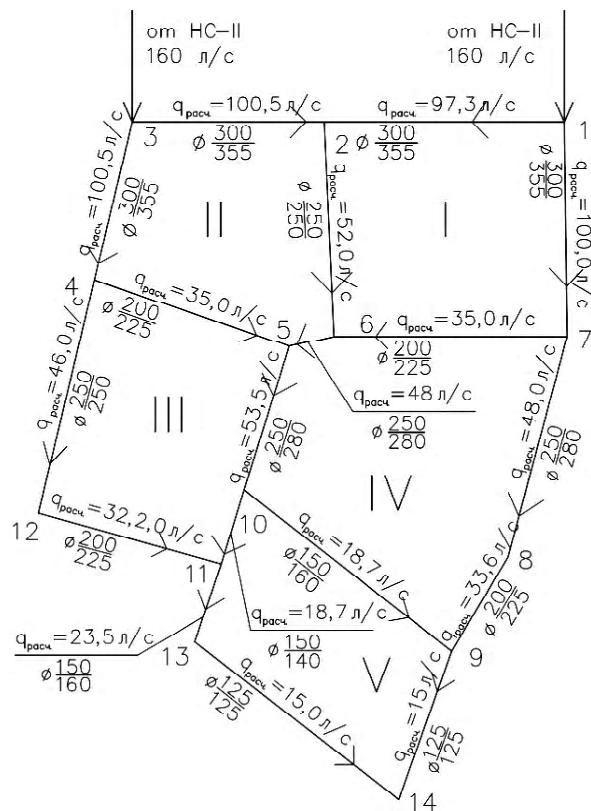
$q_i$  – расход узла, л/с;

$n$  – количество участков сети, выходящих из расчетного узла;

- 3) сравнение полученных значений с расчетным расходом по участкам, выбор большего из значений (расчетного или согласно формуле 14).

Можно провести дополнительную проверку по потерям давления и увязке колец в специальных программах.

Итоговые значения расходов и диаметров с учетом дополнительного резервирования показаны на рисунке 5.



**Рисунок 5 – Схема пятикольцевой водопроводной сети с дополнительным резервированием пропускной способности трубопроводов.**

Можно заметить, что наибольшее увеличение диаметров труб наблюдается на трубопроводах, примыкающих к водоводам. Это логично, учитывая, что в случае отключения трубопровода, идущего следом за водоводом (например, участков 3–4 или 1–7), от сети, из-за недостаточной пропускной способности фактически снижается расход на всей последующей цепочке трубопроводов. В остальной части сети подобная тенденция сильно снижается, позволяя сохранить баланс между капитальными затратами и надежностью системы, ведь в случае аварии будут экономические издержки, связанные не только с ремонтными работами, но и потерями средств из-за снижения подачи воды абонентам. Как видно из таблицы, количество аварий на большинстве действующих сетей довольно велико вследствие их сильного износа. При такой частоте отключения и при отсутствии предусмотренных средств резервирования эксплуатационные издержки будут больше. Данные наблюдения подсказывают, что необходимо, исходя из имеющихся ресурсов, предусматривать возможность дополнительного резервирования, находя оптимальный баланс между капитальными вложениями и дальнейшими затратами на эксплуатацию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О схемах водоснабжения и водоотведения : постановление Правительства Российской Федерации № 782 (с изменениями от 18 марта, 13 декабря 2016 г., 31 мая 2019 г., 22 мая 2020 г.) : утверждено Постановлением Правительства РФ 5 сентября 2013 г., г. Москва. – Текст : электронный // Минстрой России : [сайт]. – 2020. – URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/1099/> (дата обращения: 10.10.2022).
2. О водоснабжении и водоотведении : Федеральный закон № 416-ФЗ : принят Государственной думой Федер. Собр. Рос. Федерации 23 ноября 2011 г. : одобрен Советом Федерации 29 ноября 2011 г., г. Москва. – 2011 г. –

- Текст : электронный // КонсультантПлюс : [сайт]. – 2011. – URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_122867/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_122867/) (дата обращения: 10.10.2022).
3. Правила предоставления коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов : постановление Правительства Российской Федерации N 354 ( с изменениями : утверждено Постановлением Правительства РФ от 6 мая 2011 г. № 354, г. Москва). – Текст : электронный // Законодательство России : [сайт]. – 2011. – URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102147807> (дата обращения: 20.07.2022).
  4. СП 31.13330.2021. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения = Water supply. Pipelines and portable water treatment plants : свод правил : издание официальное : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 27 декабря 2021 г. N 1016 : актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84\* : дата введения 2022-01-28. – Москва : Минстрой России, 2021 г. – Текст : электронный // Минстрой России : [сайт]. – URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/02f/31.pdf> (дата обращения: 10.10.2022).
  5. Moneim, Mohamed Abdel. Modelling Reliability Based Optimization Design / Mohamed Abdel Moneim. – Текст : электронный // Scientific and Engineering Applications Using MATLAB. – London : Intechopen Limited, 2011. – Р. 87–104. – DOI: 10.5772/19452. – URL: <https://www.intechopen.com/chapters/17562> (дата обращения: 14.10.2022).
  6. Aklog, D. Reliability-based optimal design of water distribution networks / D. Aklog, Y. Hosoi. – DOI: 10.2166/ws.2003.0080. – Текст : электронный // Water Supply. – 2003. – No 3 (1–2). – P. 11–18. – URL: <https://iwaponline.com/ws/article-abstract/3/1-2/11/25698/Reliability-based-optimal-design-of-water?redirectedFrom=fulltext> (дата обращения: 14.10.2022).
  7. Аугусти, Г. Вероятностные методы в строительном проектировании / Г. Аугусти, А. Баратта, Ф. Кашиати ; перевод с английского Ю. Д. Сухова. – Москва : Стройиздат, 1988. – 584 с. – ISBN 5-274-00212-9. – Текст : непосредственный.
  8. Сайридинов, С. Ш. О некоторых аспектах повышения эффективности действующих элементов систем водоснабжения / С. Ш. Сайридинов. – Текст : электронный // Градостроительство и архитектура : научно-технический журнал. – 2021. – Том 11, № 4. – С. 11–21. – URL: <https://journals.eco-vector.com/2542-0151/article/view/99638> (дата обращения: 12.10.2022).
  9. Проблемы изношенных трубопроводов Дальнего Востока России и пути их восстановления / Л. Д. Терехов, Н. В. Твардовская, А. В. Федорчук, Е. А. Твардовская. – Текст : электронный // Яковлевские чтения-2022: системы водоснабжения и водоотведения. Современные проблемы и решения : сборник докладов участников XVII Международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика РАН С. В. Яковleva / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, инженерно-экологического строительства и механизации ; отв. ред. Н. А. Макиша. – Москва : ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», 2022 г. – С. 54–61. – URL: [https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/2022/Sbornik\\_Yakovlevskiy-cteniya\\_2022.pdf](https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/2022/Sbornik_Yakovlevskiy-cteniya_2022.pdf) (дата обращения: 13.10.2022).
  10. Адеев, И. И. Состояние водопровода города Томска / И. И. Адеев, Е. Ю. Осипова. – Текст : электронный // Материалы Международной научно-практической конференции молодых исследователей им. Д. И. Менделеева, посвященной 10-летию Института промышленных технологий и инжиниринга : сборник статей : в 2 томах, ISBN 978-5-9961-2212-7 ; том 2 / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет» ; отв. ред. А. Н. Халин. – Тюмень: ТИУ, 2019 г. – С. 295–302. – URL: <https://www.tyuuiu.ru/wp-content/uploads/2018/03/Materialy-konferentsii-im.-D.-I.-Mendeleeva-2018-Tom-2.pdf> (дата обращения: 13.10.2022).
  11. Щапова, Я. А. К оценке состояния системы водоснабжения и качества водопроводной воды в городе (по результатам опроса жителей г. Тюмени) / Я. А. Щапова. – Текст : электронный // Архитектура и архитектурная среда: вопросы исторического и современного развития – 2019 : материалы международной научно-практической конференции : в 2 томах, ISBN 978-5-9961-2134-2 ; том 2 / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет» ; отв. ред. А. Б. Храмцов. – Тюмень: ТИУ, 2019 г. – С. 209–215. – URL: <https://www.tyuuiu.ru/wp-content/uploads/2015/08/Sbornik-Arhitektura-2019-tom-2.pdf> (дата обращения: 12.10.2022).

Получена 09.10.2022

Принята 28.10.2022

Г. С. ТУРЧИНА  
ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВОДОПРОВІДНОЇ МЕРЕЖІ ШЛЯХОМ  
РЕЗЕРВУВАННЯ ЙЇ ЕЛЕМЕНТІВ  
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** Згідно з нормативними документами [3, 4], зниження кількості води, що постачається не повинно бути більше ніж 30 % від розрахункової протягом часу, який залежить від категорії міста. Зі

збільшенням терміну експлуатації відмови водопровідної мережі відбуваються частіше, бувають випадки, коли складність аварійної ситуації спричиняє повне припинення постачання води по окремих трубопроводах із-за конфігурації мережі. У разі кожної аварії з'являються економічні витрати не тільки на ремонт, але й від супутніх збитків із-за вимушеної зниження води, що постачається абонентам. У зв'язку з цим у статті розглянуті питання резервування мережі водопостачання шляхом закладання більшого поперечного перетину трубопроводів і за допомогою створення додаткових кілець на мережі. Варто відмітити, що обидва способи несуть додаткові затрати ресурсів і застосовувати їх необхідно за умови балансу між капітальними витратами й зниженням риску від збитку під час експлуатації мережі завдяки підвищенню її надійності за рахунок резервування.

**Ключові слова:** водопровідна мережа, надійність, діаметри трубопроводів, витрати води.

GALINA TURCHINA

IMPROVING THE RELIABILITY OF THE WATER SUPPLY NETWORK BY  
REDUNDANCY ITS ELEMENTS

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** According to regulatory documents [3, 4], the decrease in the amount of supplied water should not be more than 30 % of the estimated amount during the time period depending on the category of the city. As the service life increases, water network failures occur more often, there are cases where the complexity of an emergency situation entails a complete cessation of water supply through individual pipelines due to the configuration of the network. In each accident, economic costs appear not only for repairs, but also from associated losses due to a forced decrease in water supplied to subscribers. In this regard, the article considers the issues of water supply network redundancy by laying a pipelines with additional useful cross section and by creating additional loops on the network. It is worth noting that both methods carry additional resource costs, and they must be applied from the conditions of the balance between capital costs and reducing risks from losses during network operation, due to improving its reliability through redundancy

**Key words:** water supply network, reliability, diameters of pipelines, water flow rate.

**Турчина Галина Сергеевна** – магістр; асистент кафедри городского строительства и хозяйства ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: надежность сетей, методы повышения надежности сетей водоснабжения.

**Турчина Галина Сергіївна** – магістр; асистент кафедри міського будівництва та господарства ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури» Наукові інтереси: надійність систем, методи підвищення надійності мереж водопостачання.

**Turchina Galina** – MPhil; Assistant, Municipal Building and Economy Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: reliability of systems, methods of increasing reliability of water supply nets.

EDN: HXBSMI

УДК 628.336.3(08)

**В. Н. ЧЕРНЫШЕВ, А. В. МОГУКАЛО, В. В. РУЧКА**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **АЭРОБНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ СМЕСИ СЫРОГО ОСАДКА И НЕУПЛОТНЕННОГО АКТИВНОГО ИЛА С РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ ИЛОВОЙ ВОДЫ**

**Аннотация.** В статье рассмотрена проблема, связанная с аэробной стабилизацией смеси сырого осадка и избыточного активного ила. Аэробная стабилизация осадков сточных вод характеризуется простотой конструкций и эксплуатации сооружений, отличается лучшими водоотдающими свойствами стабилизованных осадков. Но продолжительность стабилизации значительно увеличивается, когда в смеси с избыточным активным илом минерализуется сырой осадок первичных отстойников. Это приводит к увеличению капитальных и эксплуатационных затрат. Обоснованы причины повышенной продолжительности аэробной стабилизации смеси сырого осадка и неуплотненного активного ила. Установлена необходимость усреднения расхода сырого осадка перед подачей его в стабилизаторы, определена необходимость соблюдения допустимого соотношения количества сырого осадка и активного ила в смеси. Предложено для сокращения продолжительности стабилизации смеси сырого осадка и неуплотненного активного ила применять рециркуляцию иловой воды. Разработана технологическая схема аэробной стабилизации с рециркуляцией иловой воды, отделенной от стабилизированной смеси в илоуплотнителе. Обосновано применение денитрификации после смешения рециркулирующей иловой воды с сырым осадком. Сформулированы задачи последующих исследований для определения отдельных параметров технологии стабилизации.

**Ключевые слова:** аэробная стабилизация, сырой осадок, активный ил, продолжительность стабилизации, Eh, rH<sub>2</sub>, рециркуляция, иловая вода, денитрификация, стабилизированный осадок.

При очистке городских сточных вод образуется значительное количество органических осадков, требующих обработки. Наиболее важной технологической процедурой обработки является стабилизация. Стабилизация предотвращает загнивание осадков, может производиться как в аэробных, так и в анаэробных условиях. Аэробная стабилизация имеет ряд преимуществ перед анаэробной. К преимуществам можно отнести простоту конструкции и эксплуатации сооружений, устойчивость к изменению качественного состава осадков, их лучшие водоотдающие свойства после стабилизации [1].

На очистной станции с биологической очисткой сточных вод в аэротенках аэробной стабилизации может подвергаться как избыточный активный ил, так и смесь сырого осадка с неуплотненным или с уплотненным активным илом. При этом продолжительность пребывания осадков в стабилизаторе разная. Так, продолжительность стабилизации избыточного активного ила составляет от 2 до 5 суток, смеси сырого осадка и неуплотненного активного ила 6–8 суток, а смеси сырого осадка и уплотненного активного ила достигает 8–12 суток. Увеличение продолжительности стабилизации очевидно связано с присутствием в смеси сырого осадка и повышением за счет этого концентрации взвешенных веществ. Сырой осадок не содержит аэробных микроорганизмов, но его органические вещества являются питанием для аэробов активного ила. При аэрации смеси сырой осадок постепенно перерабатывается активным илом, приобретая его хлопьевидную структуру. На это расходуется дополнительное время. Фактически стабилизация смеси начинается только после переработки органических веществ сырого осадка в активный ил. Следует заметить, что увеличенная продолжительность пребывания смеси осадков в стабилизаторе приводит к увеличению его объема и значительному росту капитальных и эксплуатационных затрат при строительстве и эксплуатации сооружений по стабилизации. Поэтому це-

© В. Н. Чернышев, А. В. Могукало, В. В. Ручка, 2022



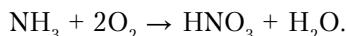
лью исследований является сокращение объема стабилизаторов. Главная задача этих исследований – разработка технологии аэробной стабилизации с рециркуляцией иловой воды стабилизированного ила.

Как показали предварительные исследования, переработка сырого осадка избыточным активным илом из вторичных отстойников занимает ориентировочно около двух суток аэрации. Затем происходит самоокисление ила, которое условно может быть описано следующим выражением:



где  $\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N}$  – гипотетическая формула активного ила.

Присутствие кислорода и образование азота аммонийного в результате самоокисления создают условия для нитрификации:



При нитрификации за счет образования азотной кислоты снижается рН жидкой фазы стабилизированной смеси, а скорость нитрификации падает, что может являться еще одной причиной увеличения продолжительности стабилизации. Кроме того, в стабилизируемом иле постепенно снижается концентрация взвешенных веществ, повышается их зольность, а также снижается щелочность иловой воды, в иловой воде растет содержание нитратов.

В процессе аэробной стабилизации смеси сырого осадка и активного ила при эксплуатации возникают и другие проблемы. Эти проблемы могут быть связаны как с неравномерностью поступления сырого осадка на стабилизацию, так и с разными значениями окислительно-восстановительного потенциала ( $Eh$ ) сырого осадка и активного ила. Неравномерное поступление на стабилизацию сырого осадка вызвано его периодической выгрузкой из первичных отстойников, что приводит к неустойчивой работе стабилизаторов. Кроме того, частицы сырого осадка гидрофильны и окружены гидратными оболочками. Это тормозит диффузию к поверхности частиц кислорода, необходимого для дыхания аэробов активного ила, обеспечивающих окисление органических веществ сырого осадка. Как показали наблюдения за процессом стабилизации, скорость обработки осадка до начала формирования его хлопьевидной структуры зависит от соотношения количеств сухого вещества сырого осадка и активного ила в смеси. Так, при небольшом количестве осадка формирование хлопьевидной структуры смеси наблюдалось значительно быстрее, чем при большом. Следовательно, в последнем случае аэробная стабилизация фактически начиналась позже, когда завершится формирование хлопьевидной структуры смеси.

В некоторых случаях, когда это соотношение достигало определенного, достаточно высокого значения, происходило обволакивание хлопьев активного ила сырым осадком и процесс переработки осадка в активный ил, а также и аэробная стабилизация практически прекращались совсем. Реально такая ситуация может возникнуть при залповой подаче сырого осадка в стабилизатор. Это подтверждено в ходе пусконаладочных работ на производственной установке по стабилизации [3]. Восстановление процесса стабилизации в этом случае было достигнуто только после семи суток аэрации. В это время в стабилизатор подавался только активный ил. Таким образом, для устойчивого процесса аэробной стабилизации смеси сырого осадка и активного ила нельзя допускать залпового поступления в стабилизаторы сырого осадка, чтобы исключить обволакивание им хлопьев активного ила. Так как допустимое соотношение количеств сырого осадка и активного ила может быть заранее неизвестным, это соотношение следует определять экспериментальным путем.

Как было отмечено выше, на процессы аэробной стабилизации смеси сырого осадка и активного ила оказывает влияние величина окислительно-восстановительного потенциала ( $Eh$ ). Величина  $Eh$  характеризует количество в водных растворах веществ, находящихся в окисленной или восстановленной формах, а также может характеризовать содержание окислителей и восстановителей в осадках сточных вод.

В биологических системах для характеристики окислительно-восстановительных условий используется параметр  $rH_2$ . Этот параметр представляет собой отрицательный логарифм давления молекулярного водорода в среде. Его величина может изменяться в пределах 0–41 и свидетельствует о присутствии в осадках как анаэробных, так и аэробных микроорганизмов. Величина параметра  $rH_2$  зависит от  $Eh$  и  $pH$  и вычисляется по выражению [4, 5]:

$$rH_2 = \frac{Eh}{0,029} + 2pH.$$

Известно, что облигатные анаэробные микроорганизмы могут существовать при  $rH_2$  не выше 0–20, а размножаться при  $rH_2$  3–5. Строгие аэробы существуют при  $rH_2$  12–15, размножаются при  $rH_2$  12–36 [4]. Следует отметить, что сырой осадок характеризуется анаэробной средой, содержит восстановленные формы органических веществ и не содержит растворенного кислорода. Напротив, среда активного ила аэробная, содержащая растворенный кислород и окисленные формы продуктов биологического распада. Таким образом, при аэробной стабилизации сырого осадка и активного ила происходит смешивание анаэробной (восстановительной) и аэробной (окислительной) среды.

В исследованиях была поставлена задача по определению значений параметра  $rH_2$  сырого осадка и активного ила действующих очистных сооружений. Установлено, что параметр Eh сырого осадка очистных сооружений находился в пределах  $-100 \div -150$  мв, pH в пределах 5,2–6,1. Отрицательное значение Eh свидетельствует о восстановительном характере среды сырого осадка. Величина параметра Eh активного ила находилась в пределах  $+150 \div +200$  мв, pH – в пределах 7,3–7,8. Положительная величина Eh означает, что в своей среде активный ил содержит окисленные формы веществ. Используя вышеприведенное выражение для определения  $rH_2$ , были вычислены значения этих величин для сырого осадка и активного ила. Результаты вычисления приведены в таблице.

**Таблица** – Влияние Eh и pH на величину  $rH_2$

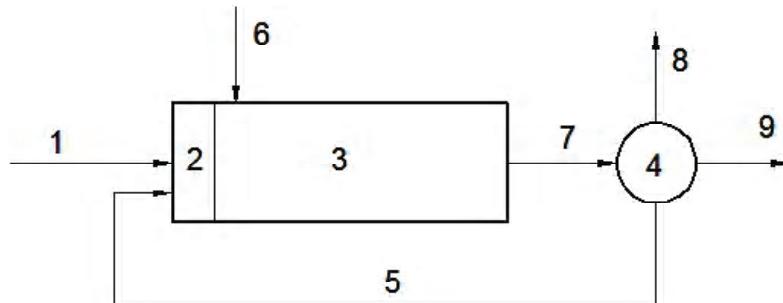
Видосадка	Параметры		
	Eh, в	pH	$rH_2$
Сырой осадок	0,10	6,1	8,75
	0,15	5,2	5,23
Активный ил	+0,15	7,3	19,77
	+0,20	7,8	22,50

Данные таблицы свидетельствуют о том, что среда в сыром осадке действительно восстановительная, а в активном иле окислительная. Это означает, что в сыром осадке обеспечиваются условия для жизнедеятельности анаэробных микроорганизмов, а в активном иле условия для жизнедеятельности аэробных микроорганизмов. При смешении сырого осадка и активного ила в работающем аэробном стабилизаторе следует ожидать снижения величины  $rH_2$  смеси по сравнению с  $rH_2$  активного ила. Чем больше разница в значениях  $rH_2$ , тем больше будет время от момента смешения сырого осадка с активным илом до формирования хлопьевидной структуры смеси. Это связано с ухудшением условий жизнедеятельности аэробов активного ила. Таким образом, смешение сырого осадка с избыточным активным илом из вторичных отстойников может значительно сдвигать в большую сторону время начала стабилизации.

В ходе изучения литературных источников авторам не удалось получить развернутой информации по методам сокращения продолжительности пребывания осадков в стабилизаторах. Обратили на себя внимание только технологические схемы стабилизации с использованием рециркуляции уплотненного стабилизированного осадка. Рециркуляция в этом случае предназначалась для улучшения водоотдающих свойств стабилизированного осадка [1].

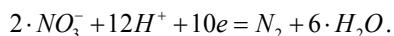
Авторами для сокращения продолжительности пребывания, а следовательно, объема стабилизатора предложена несколько иная схема. Она включает обработку сырого осадка рециркулирующей иловой водой из илоуплотнителя стабилизатора. Предлагаемая технологическая схема аэробной стабилизации с рециркуляцией иловой воды приведена на рисунке.

Известно, что иловая вода после аэробной стабилизации в результате нитрификации содержит значительное количество нитратов. Анализ иловой воды показал, что содержание нитратов в ней может достигать 320...540 мг/дм<sup>3</sup>. Кроме того, иловая вода после илоуплотнителя содержит незначительное количество взвешенных веществ и органических примесей и в ней практически отсутствуют микроорганизмы активного ила. При смешении иловой воды с сырым осадком при дефиците или отсутствии растворенного кислорода в смеси, а также наличии органических веществ сырого осадка в ней создаются условия для денитрификации. Процесс осуществляется денитрифицирующими бактериями, использующими нитрат-ионы в качестве акцептора электронов, а в качестве донора органические вещества сырого осадка [6]. В результате ионы водорода органических веществ и ионы кислорода нитратов, взаимодействуя, образуют воду, а нитраты восстанавливаются до молекулярного азота. Денитрификация сопровождается увеличением щелочности и pH среды, что гарантирует восстановление азота до N<sub>2</sub> [6]. Кроме того, за счет использования денитрификаторами органических



**Рисунок** – Схема аэробной стабилизации смеси сырого осадка и неуплотненного активного ила с рециркуляцией иловой воды: 1 – подача сырого осадка; 2 – отделение денитрификации; 3 – аэробный стабилизатор; 4 – илоуплотнитель; 5 – рециркулирующая иловая вода; 6 – подача избыточного активного ила из вторичного отстойника; 7 – стабилизированный осадок; 8 – удаление иловой воды в аэротенки; 9 – удаление уплотненного осадка на обезвоживание.

веществ в ассимиляционных и дессимиляционных процессах содержание этих веществ снижается. Таким образом, при денитрификации происходят окислительно-восстановительные процессы, которые можно описать следующим выражением:



В приведенном выражении ион  $NO_3^-$  является окислителем, азот в ходе реакции восстанавливается до  $N_2$ . Ионы водорода являются продуктом биологического окисления органических веществ сырого осадка, освобождающиеся при этом электроны участвуют в переводе азота из степени окисления +5 в нулевую степень окисления. Окислительно-восстановительный потенциал приведенной выше системы определялся с помощью уравнения Нернста. При температуре +25 °C и атмосферном давлении это уравнение выглядит следующим образом:

$$Eh = Eh^0 + \frac{0,059}{n} \cdot \lg \frac{[NO_3^-]^2 \cdot [H^+]^{12}}{[N_2] \cdot [H_2O]^6}.$$

Здесь  $Eh^0$  – стандартный электродный потенциал, равный +1,24 в [7];  
n – количество электронов, получаемых нитрат-ионом.

В уравнении под знаком логарифма в числителе находятся концентрации окислителей, в знаменателе восстановителей. Прибавка воды в ходе окислительно-восстановительной реакции в разбавленном растворе, каким является наша система, на общую ее концентрацию не влияет, поэтому эту прибавку в расчетах не учитывают. Кроме того, концентрация газообразного азота является величиной постоянной, так как входит в величину  $Eh^0$ , и в уравнении Нернста принимается за единицу. В качестве примера по определению окислительно-восстановительного потенциала был принят наиболее распространенный вариант стабилизации смеси сырого осадка и активного ила, когда количество сухого вещества в сыром осадке и активном иле близки друг к другу по значению. При этом условии в смеси сырого осадка и рециркулирующей иловой воды молярная концентрация нитратов принята  $6,85 \cdot 10^{-3}$  моль/дм<sup>3</sup>, концентрация ионов водорода  $41 \cdot 10^{-3}$  моль/дм<sup>3</sup>. Вычисленное значение окислительно-восстановительного потенциала будет равно:

$$Eh = +1,24 + \frac{0,059}{10} \cdot \lg (6,85 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (41 \cdot 10^{-3})^{12} = +1,116 \text{ В.}$$

Результат вычисления Eh свидетельствует о том, что при концентрации нитратов в смеси сырого осадка и иловой воды, равной  $6,85 \cdot 10^{-3}$  моль/дм<sup>3</sup>, окислительная способность среды снижается относительно стандартных условий на +0,134 В. Но в то же время положительное значение Eh позволяет аэробным микроорганизмам избыточного активного ила, поступающего из вторичных отстойников, беспрепятственно осуществлять окислительные процессы. С учетом того, что денитрификация обычно осуществляется в течение нескольких часов, а аэробные окислительные процессы не тормозятся в начале стабилизации, возникает возможность в сокращении продолжительности пребывания осадков в стабилизаторе.

Таким образом, предложенная технология аэробной стабилизации дает возможность сократить объем стабилизаторов за счет использования денитрификации при обработке сырого осадка, а также создания благоприятных условий для аэробных процессов при подаче избыточного активного ила из вторичных отстойников на стабилизацию.

В то же время имеются нерешенные задачи, требующие проведения дополнительных исследований. К ним относятся оценка влияния расхода рециркулирующей иловой воды на скорость денитрификации, на величину Eh, pH и rH<sub>2</sub> смеси сырого осадка и иловой воды, а также оценка концентраций нитратов, кислорода в иловой воде до и после уплотнения стабилизированного осадка, влияние этих концентраций на продолжительность стабилизации.

## ВЫВОДЫ

1. Установлено, что причиной повышенной продолжительности стабилизации смеси сырого осадка и неуплотненного активного ила являются анаэробные свойства сырого осадка, что требует длительной его переработки активным илом. При этом в начальный период смешивания сырого осадка и активного ила аэробные микроорганизмы находятся в неблагоприятных условиях жизнедеятельности, что увеличивает продолжительность стабилизации.

2. Установлена возможность обволакивания хлопьев активного ила сырым осадком при больших его концентрациях в смеси, что приводит к прекращению аэробной стабилизации. Аналогичная ситуация может возникать при неравномерной подаче сырого осадка в стабилизатор.

3. Предложена технологическая схема аэробной стабилизации с рециркуляцией иловой воды, обеспечивающая сокращение продолжительности обработки смеси сырого осадка и активного ила.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обработка осадков городских сточных вод : учебное пособие / Л. Р. Хисамеева, А. С. Селюгин, Р. Н. Абитов [и др.]. – Казань : Изд-во КГАСУ, 2016. – 105 с. – ISBN 978-5-7829-0496-8. – Текст : непосредственный.
2. Жмур, Н. С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками / Н. С. Жмур. – Москва : АКВАРОС, 2003. – 512 с. – ISBN 5-901652-05-3. – Текст : непосредственный.
3. Чернышев, В. Н. Экспериментальные исследования глубокой минерализации осадков в производственных условиях / В. Н. Чернышев, В. И. Нездойминов. – Текст : непосредственный // Науковий вісник будівництва. – 2011. – Випуск 63. – С 498 – 501.
4. Скиба, Е. А. Основы промышленной микробиологии : учебное пособие / Е. А. Скиба, Н. А. Шавыркина, М. Э. Ламберова ; Алтайский государственный технический университет, БТИ. – Бийск : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2013. – 110 с. – URL : <http://irbis.bti.secna.ru> (дата обращения: 02.03.2022). – Текст : электронный.
5. Чурбанова, И. Н. Микробиология : учебник для вузов по специальности «Рациональное использование водных ресурсов и обезвреживание промышленных стоков» / И. Н. Чурбанова. – Москва : Высшая школа, 1987. – 279 с. – Текст : непосредственный.
6. Яковлев, С. В. Биохимические процессы в очистке сточных вод / С. В. Яковлев, Т. А. Карюхина. – Москва : Стройиздат, 1980. – 200 с. – (Охрана окружающей среды). – Текст : непосредственный.
7. Лурье, Ю. Ю. Справочник по аналитической химии / Ю. Ю. Лурье ; 6-е изд. перераб. и доп. – Москва : Химия, 1989. – 446 с. – Текст : непосредственный.

Получена 10.10.2022

Принята 28.10.2022

В. М. ЧЕРНИШЕВ, А. В. МОГУКАЛО, В. В. РУЧКА  
АЕРОБНА СТАБІЛІЗАЦІЯ СУМІШІ СИРОГО ОСАДУ Й НЕУЩІЛЬНЕНОГО  
АКТИВНОГО МУЛУ З РЕЦИРКУЛЯЦІЄЮ МУЛОВОЇ ВОДИ  
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** У статті розглянута проблема, пов'язана з аеробною стабілізацією суміші сирого осаду й надлишкового активного мулу. Аеробна стабілізація осадів стічних вод характеризується простотою конструкції й експлуатації споруд, відрізняється кращими властивостями віддавати воду стабілізованих осадів. Але тривалість стабілізації значно збільшується, коли в суміші з надлишковим активним мулом мінералізується сирий осад первинних відстійників. Це призводить до збільшення капітальних і експлуатаційних витрат. Обґрунтовані причини підвищеної тривалості аеробної стабілізації суміші сирого осаду й неущільненого активного мулу. Установлено необхідність усереднення витрати сирого осаду перед подачею його в стабілізатори, визначено необхідність дотримання допустимого співвідношення кількості сирого осаду й активного мулу в суміші. Запропоновано для скорочення тривалості стабілізації суміші сирого осаду й неущільненого активного

мулу застосовувати рециркуляцію мулової води. Розроблено технологічну схему аеробної стабілізації з рециркуляцією мулової води, відділеної від стабілізованої суміші в мулоущільнювачі. Обґрунтовано застосування денітрифікації після змішання мулової води, яка рециркулює, із сирим осадом. Сформульовано завдання наступних досліджень для визначення окремих параметрів технології стабілізації.

**Ключові слова:** аеробна стабілізація, сирий осад, активний мул, тривалість стабілізації, Eh, rH<sub>2</sub>, рециркуляція, мулова вода, денітрифікація, стабілізований осад.

VALENTIN CHERNSHEV, ANASTASIA MOGUKALO, VLADISLAV PUCHKA  
AEROBIC STABILIZATION OF A MIXTURE OF CRUDE SLUDGE AND NON-COMPACTED ACTIVATED SLUDGE WITH SLUDGE WATER RECIRCULATION  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** The article deals with the problem of aerobic stabilization of a mixture of raw sludge and excess activated sludge. Aerobic stabilization of sewage sludge is characterized by simplicity of construction and operation of structures, characterized by the best water-releasing properties of stabilized precipitation. But the duration of stabilization increases significantly when the raw sediment of primary sedimentation tanks is mineralized in a mixture with excess activated sludge. This leads to an increase in capital and operational costs. The reasons for the increased duration of aerobic stabilization of a mixture of raw sediment and unconsolidated activated sludge are substantiated. The necessity of averaging the consumption of raw sludge before feeding it to the stabilizers is established, the necessity of observing the permissible ratio of the amount of raw sludge and activated sludge in the mixture is determined. It is proposed to use sludge water recirculation to reduce the duration of stabilization of a mixture of raw sludge and unconsolidated activated sludge. A technological scheme of aerobic stabilization with recirculation of sludge water separated from the stabilized mixture in a silt compactor has been developed. The use of denitrification after mixing recirculating sludge water with raw sediment is justified. The tasks of subsequent research to determine individual parameters of the stabilization technology are formulated.

**Key words:** aerobic stabilization, crude sludge, activated sludge, duration of stabilization, Eh, rH<sub>2</sub>, recirculation, sludge water, denitrification, stabilized sludge.

**Чернышев Валентин Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения, водоотведения и охрана водных ресурсов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: интенсификация существующих методов и создание новых технологий очистки сточных вод и обработки осадков.

**Могукало Анастасия Вадимовна** – ассистент кафедры водоснабжения, водоотведения и охрана водных ресурсов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: обработка осадков.

**Ручка Владислав Владиславович** – ассистент кафедры водоснабжения, водоотведения и охрана водных ресурсов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: обработка осадков, инновационные технологии возведения сетей и сооружений водоснабжения с применением современных материалов.

**Чернишев Валентин Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри водопостачання, водовідведення та охорони водних ресурсів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: інтенсифікація існуючих методів та створення нових технологій очищення стічних вод та обробки осадів.

**Могукало Анастасія Вадимівна** – асистент кафедри водопостачання, водовідведення та охорони водних ресурсів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: обробка осадів.

**Ручка Владислав Владиславович** – асистент кафедри водопостачання, водовідведення та охорони водних ресурсів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: обробка осадів, інноваційні технології зведення мереж та споруд водопостачання із застосуванням сучасних матеріалів.

**Chernishev Valentin** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Water Supply, Sanitation and Protection of Water Resources Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: intensification of existing methods and creation of new technologies for wastewater treatment and sludge treatment.

**Mogukalo Anastasia** – assistant, Water Supply, Sanitation and Protection of Water Resources Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: sediment treatment.

**Ruchka Vladislav** – assistant, Water Supply, Sanitation and Protection of Water Resources Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: rainfall processing, innovative technologies for building a fence and spores of water supply from the stagnation of modern materials.

EDN: JCOUPW

УДК 628.396

**А. С. ПАВЛЮЧЕНКО<sup>a</sup>, Н. И. ГРИГОРЕНКО<sup>b</sup>**<sup>a</sup> Филиал «ЦКИПИВЛ» ГУП ДНР «ВОДА ДОНБАССА», <sup>b</sup> ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»**МЕТОДЫ БОРЬБЫ С ГИДРОУДАРОМ НА НАСОСНЫХ СТАНЦИЯХ  
ПУТЕМ РАЦИОНАЛЬНОЙ ОБВЯЗКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ**

**Аннотация.** Рассматриваются условия и последствия возникновения гидроудара на насосных станциях. Общеизвестно, что конфигурация обвязки оказывает существенное и зачастую критичное влияние на стабильность работы центробежных насосов, поэтому данная статья посвящена поиску решения предупредить или минимизировать последствия гидроудара еще на стадии проектирования или при реконструкции существующих насосных станций. Для решения поставленной задачи предложены схема с устройством дополнительной обводной линии, схема для насосов, начинающих работу на приоткрытую задвижку, и схема обвязки со сбросом воды из напорной линии во всасывающую. Данные обвязки технологического оборудования насосной станции являются энергоэффективными, просты в обслуживании, поскольку в них нет сложных частей или механизмов, успешно работают независимо от температуры окружающей среды, а также при ложном срабатывании системы.

**Ключевые слова:** центробежные насосы, гидроудар, обвязка насосов, напорный трубопровод, пожаротушение, линия пробного пуска.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ**

Исходя из данных различных исследований, причиной около 60 % прорывов трубопроводов являются гидравлические удары [5, 6]. При неблагоприятных условиях (при длине трубопровода более ста метров и расходе, составляющем лишь десятые доли литра в секунду) гидравлический удар может вызвать повреждения сетей. При этом на насосной станции даже короткие трубопроводы, но без промежуточных опор и недостаточно закрепленные, могут быть повреждены резонансными колебаниями [4]. На напорных трубопроводах насосных станций гидравлический удар возникает вследствие аварийного или неподготовленного специальными мероприятиями отключения электропитания приводных двигателей насосов и мгновенном закрытии обратного клапана, значительно увеличивается давление и возникает прямой удар [7]. Последствиями гидравлических ударов являются серьезные аварии на трубопроводах и оборудовании насосных станций, разрушения строительных конструкций, сбой технологических процессов [4–9].

**АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ**

В литературе рассматривается множество решений по предотвращению, защите и устранению последствий от гидроудара в различных сферах промышленности и коммунального хозяйства [4–9]. Одним из методов борьбы с гидроударом на насосных станциях является более совершенная обвязка трубопроводов. Также одной из главных причин внедрения новых схем обвязок насосов на насосных станциях становится изменение нормативных документов в сторону ужесточения норм проектирования насосных станций, особенно станций пожаротушения [1, 2]. Основная проблематика и акцент в современном проектировании смешается в сторону энергоэффективности и факту уменьшения количества обслуживающего персонала на объектах водоснабжения и канализации, а также требования уменьшения воздействия на сеть гидроударов.

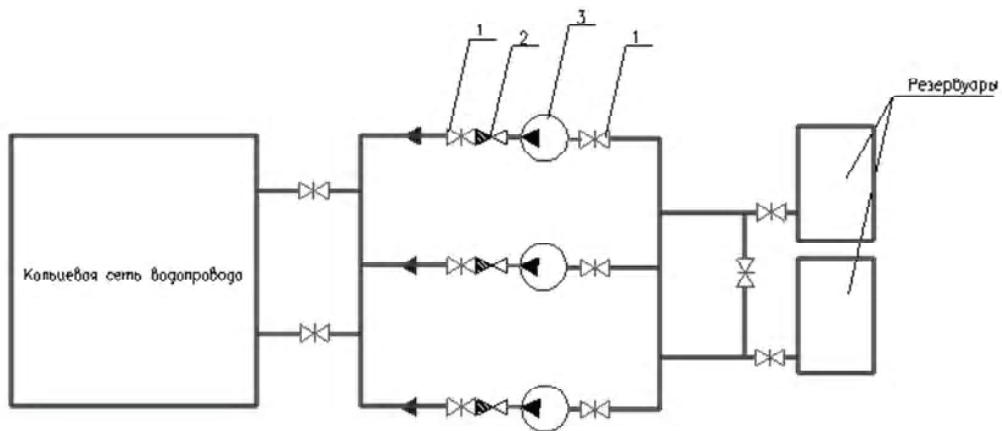


## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Защита от гидроудара, повышение надежности и эксплуатационных характеристик работы насосных станций с центробежными насосами путем рациональной обвязки насосов и трубопроводов.

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Из опыта проектирования и эксплуатации можно сказать, что использование центробежных насосов в системах водоснабжения и канализации предпочтительно по ряду причин: их просто монтировать и обслуживать, контроль за их работой можно легко автоматизировать и проводить дистанционно, а также они обеспечивают равномерную подачу жидкости. Однако новое насосное оборудование, особенно большой производительности, требует более внимательного подхода в вопросе методов обвязки, поскольку грамотное решение данного вопроса влечет за собой повышение надежности системы, использование насосного оборудования в диапазоне наибольшего КПД, работу системы в границе требуемых параметров и т. д. При этом план стандартной обвязки насосов и оборудования выглядит как на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Стандартная обвязка оборудования на насосных станциях: 1 – задвижка; 2 – обратный клапан; 3 – насосный агрегат.**

Главные недостатки данной обвязки:

1. Отсутствует защита против гидроудара. Противоречие наблюдается с параграфом 11 [1], где большое внимание уделено мерам по предотвращению возникновения гидроудара, который может произойти при ложном срабатывании противопожарной системы [11], изношенности арматуры, несогласованность действий подразделений по ремонту водопроводных сетей и т. д. Аварии при гидроударах происходят очень часто и последствия таких аварий катастрофические, что ведет к нарушению норм [1] п. 11.4. Ремонтные бригады не всегда могут вложиться в установленное время по ремонту трубопроводов, так как участок повреждения может быть достаточно большой.

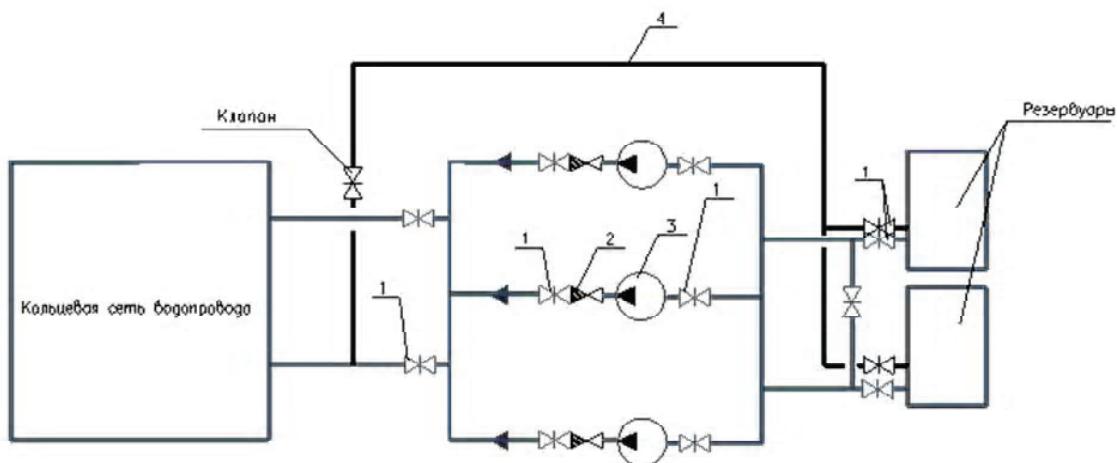
2. Невозможность применения современных насосов повышенного КПД, т. к. большинство таких насосов – центробежные и при стандартной схеме обвязки очень трудно настроить сопротивление сети, чтобы показатели насоса находились в рабочей зоне. На практике на местах применяют дросселирование задвижкой, однако нормативно данный метод запрещен (п. 3.1.1 [3] ... «арматура запорная: Арматура, предназначенная для перекрытия потока рабочей среды с определенной герметичностью»).

3. Пониженная надежность системы. Рассматриваемая схема противоречит [2] пункту 8.1, в котором говорится, что системы водоснабжения по степени обеспеченности подачи воды подразделяются на категории по [1]. Элементы систем водоснабжения II категории, повреждения которых могут нарушить подачу воды на пожаротушение, должны относиться к I категории.).

Согласно [2] п.11.3 насосные станции пожаротушения должны проектироваться, как правило, без постоянного обслуживающего персонала. Старая схема обвязки не позволяет проводить пробные пуски пожарных насосов согласно регламенту и не вызывав аварийную ситуацию на сети противопожарного водопровода. Также невозможность автоматизации станции для работы в любом из режимов, что противоречит п. 11.3 [2].

Для насосных станций других назначений требуется соблюдать требования п.11.27 [1]. Для защиты от гидравлического удара допускается применять: сброс воды из напорной линии во всасывающую, впуск воды в местах возможного образования разрывов сплошности потока в водопроводе. Эти параметры противодействия гидроудару учтены в схемах, рассмотренных далее.

Если для противопожарных насосных станций применять схему обвязки насосов, указанную на рисунке 1, то при ложном срабатывании системы может запуститься пожарный насос, и если в системе на данный момент нет водоразбора или он минимален, то создаются условия для гидроудара. Этого можно избежать, если применить схему обвязки насосного оборудования с линией пробного пуска, представленную на рисунке 2.



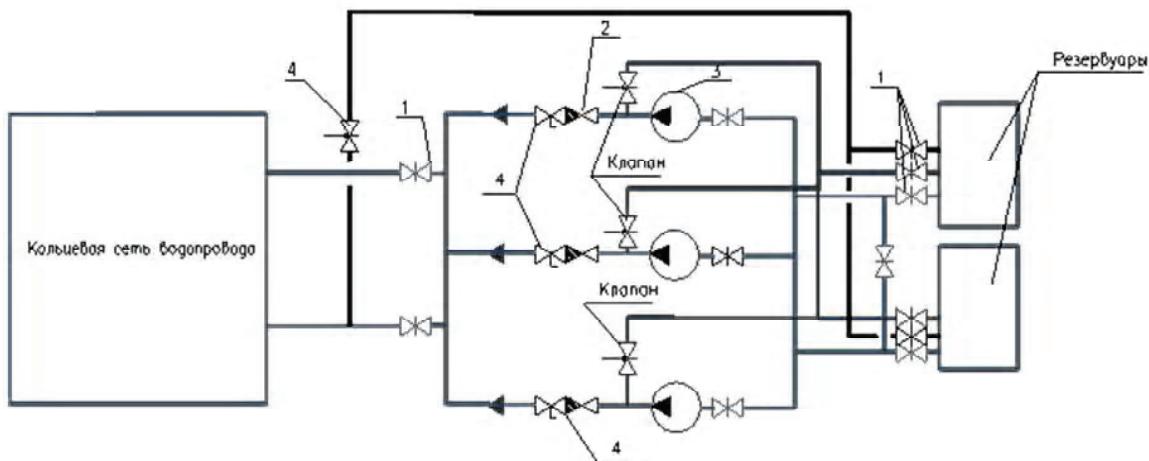
**Рисунок 2 – Схема обвязки оборудования на насосных станциях с применением дополнительной линии:** 1 – задвижка; 2 – обратный клапан; 3 – насосный агрегат; 4 – дополнительная линия (пробного пуска пожарных насосов).

Как видно на рисунке 2, к обоим напорным трубопроводам подключена дополнительная линия – байпас (линия пробного пуска противопожарных насосов), на которой установлен регулировочный клапан давления. Напор данного клапана должен соответствовать максимальному напору насосной станции, т. к. сама система запроектирована на это же давление, но срабатывать при угрозе гидроудара, т. е. при определенном превышении максимального давления системы.

Еще одной особенностью данной схемы является ее гибкость при изменении показателей графика совместной работы «насос-трубопровод». Дополнительный трубопровод (или трубопровод пробного пуска пожарных насосов) позволяет насосному оборудованию находиться в рабочей зоне даже при авариях на линии, резком закрытии или заклинивании запорной арматуры. Данный момент важен, поскольку техническое состояние и определение остаточного ресурса центробежных насосов учитывает время работы насоса при закрытой арматуре на напорном патрубке, которое не должно превышать времени, указанного в эксплуатационной документации [10]. На трубопроводе пробного пуска насоса возможно также устанавливать кран шаровый регулирующий для того, чтобы служба эксплуатации могла при проведении пуско-наладочных работ создать требуемые потери напора и насос даже при пробном пуске работал, не выходя из рабочей зоны, что уменьшил износ оборудования.

В случае применения высокопроизводительных насосов, которые начинают работу на приоткрытую задвижку, в схему, приведенную на рисунке 2, необходимо внести некоторые корректировки. В паспорте таких насосов есть регламент запуска и степень открытия запорной арматуры. То есть, если произвести обвязку такого рода насосов по традиционной схеме (рисунок 1), то они сгорят при первом пуске. Поэтому для их работы предлагается схема обвязки, приведенная на рисунке 3.

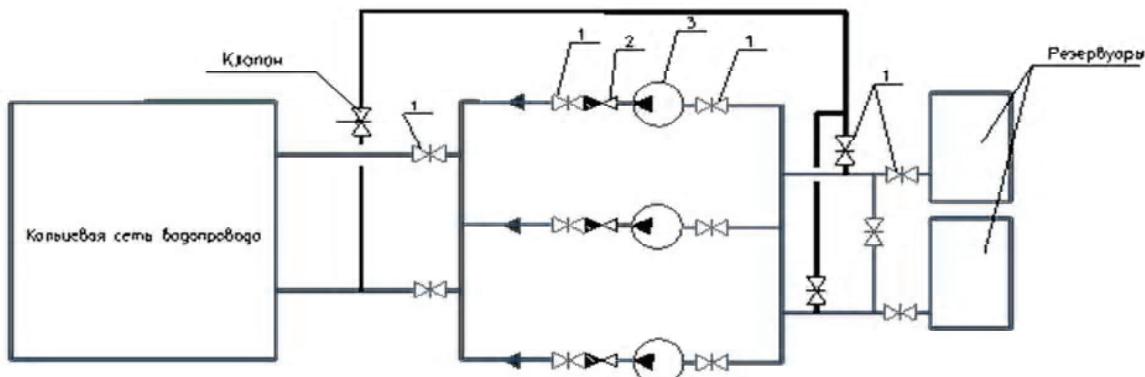
Системы водяного пожаротушения проектируются таким образом, что пожарные насосы работают только непосредственно в момент пожара, а всё остальное время они находятся в режиме ожидания. К сожалению, абсолютно любая техника имеет тенденцию выходить из строя в случае длительного простоя, именно по этой довольно простой причине и возникает необходимость «толкать» пожарные насосы, т. е. периодически осуществлять их пробные пуски. При стандартной схеме обвязки насосных станций во избежание гидроудара при отсутствии водоразбора в сети пожаротушения



**Рисунок 3 – Схема обвязки насосов, которые начинают работу на приоткрытую задвижку:** 1 – задвижка; 2 – обратный клапан; 3 – насосный агрегат; 4 – клапан, регулирующий давление; 5 – кран шаровый.

(такое часто встречается на промышленных предприятиях, поскольку обычно противопожарное водоснабжение проектируется отдельной линией) – воду нужно сливать, что не всегда возможно в отдельных регионах нашей страны (Сибирь, часть Забайкалья и др.) и всегда нерационально.

В соответствии с требованиями [1] для насосных станций других назначений требуется соблюдать п.11.27. Для защиты от гидравлического удара допускается применять: сброс воды из напорной линии во всасывающую. Данная схема приведена на рисунке 4.



**Рисунок 4 – Схема обвязки со сбросом воды из напорной линии во всасывающую:** 1 – задвижка; 2 – обратный клапан; 3 – насосный агрегат.

На практике такие схемы встречаются крайне редко, так как, подключая напорный трубопровод во всасывающий создаются условия нестабильной работы насоса, а также повышается вероятность кавитации при использовании высокопроизводительных или высоко напорных агрегатов. При такой схеме подключения, во-первых, нагревается вода и попадает сразу во всасывающую линию в отличие от других схем, где она смешивается с другими стоками в резервуаре и понижает свою температуру, а также ведет к увеличению скорости во всасывающей линии. Поэтому при проектировании необходимо выполнить ряд дополнительных расчетов, чтобы насосная станция работала в заданных параметрах.

## ВЫВОД

Обвязка насосов и оборудования на сегодняшний день может решить часть проблем и недостатков в работе всей системы, при этом инженеры-проектировщики систем ВВ должны расширять область исследования в другие сферы промышленности и адаптировать аналоги различных обвязок в свою

работу. Рациональные обвязки технологического оборудования насосной станции, предложенные в данной статье, могут служить решением вопроса угрозы гидроудара и порыва сетей, являются энергоэффективными, просты в обслуживании, поскольку в них нет сложных частей или механизмов, успешно работают независимо от температуры окружающей среды, а также при ложном срабатывании системы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 31.13330.2021. СНиП 2.04.02-84\*. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 27 декабря 2021 г. N 1016/пр : замен СП 31.13330.2012 : дата введения 2011-12-29 / исполнитель Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН). – Москва : Минстрой России, 2021. – 155 с. – URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/142012/> (дата обращения: 01.10.2022). – Текст: электронный.
2. СП 8.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Наружное противопожарное водоснабжение. Требования пожарной безопасности = The fire protection systems. Outdoor fire-fighting water supply. Fire safety requirements : утвержден и введен в действие Приказом Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий от 30 марта 2020 г. N 225 : замен СП 8.13130.2009 : дата введения 2020-09-30 / разработан и внесен ФГБУ ВНИИПО МЧС России. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 18 с. – URL: <https://docs.cntd.ru/.document/565391175> (дата обращения: 01.10.2022). – Текст : электронный.
3. ГОСТ 24856-2014. Арматура трубопроводная. Термины и определения : издание официальное : введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26 ноября 2014 г. N 1902-ст : введен впервые : дата введения 01-08-2020. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 86 с. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/58457/> (дата обращения: 01.10.2022). – Текст : электронный.
4. Гидроудар: причины, анализ и способы предотвращения / Х. Й. Людеке, Б. Котэ, К. Паули. – Текст : непосредственный // Водоснабжение и санитарная техника. – 2015. – № 8. – С. 62–69.
5. Таль, Л. Анализ пульсаций давления и подбор оборудования для защиты систем водоснабжения от гидроударов / Л. Таль. – Текст : непосредственный // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2017. – № 9(117). – С. 54–57.
6. Устройство для исследования гидравлических ударов на насосной станции / С. В. Саркисов, А. Н. Корпусов, Г. В. Макарчук. – Текст : непосредственный // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2019. – № 4. – С. 48–52.
7. Паламарчук, Н. В. Защита высоконапорных трубопроводных систем и насосных установок от гидравлических ударов / Н. В. Паламарчук, Ю. В. Тимохин, А. П. Соломин. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов ДонИЖТ. – 2018. – № 48. – С. 46–60.
8. Газаров, А. Р. Гидравлический удар в трубопроводах: расчет и предотвращение / А. Р. Газаров, Р. А. Колосов, Е. И. Ховрина. – Текст : непосредственный // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2019. – № 12. – С. 557–559.
9. Сайфуллин, И. Ш. К вопросу о защите трубопроводных систем от действия гидроударов / И. Ш. Сайфуллин, Л. Е. Украинский. – Текст : непосредственный // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2018. – № 6. – С. 21–26.
10. Экспертиза промышленной безопасности центробежных насосов / Е. В. Сенаторова, А. И. Смирнов, Т. В. Шипунова, М. В. Шабалин. – Текст : непосредственный // Евразийский Союз Ученых. – 2016. – № 1 (22). – С. 116–118.
11. Ложные тревоги систем пожарной сигнализации / Н. А. Пашкевич, Е. А. Расщекина, Е. Лытаягин [и др.]. – Текст : непосредственный // Технические науки – от теории к практике. – 2012. – № 15. – С. 150–156.

Получена 30.09.2022

Принята 28.10.2022

О. С. ПАВЛЮЧЕНКО<sup>a</sup>, Н. І. ГРИГОРЕНКО<sup>b</sup>

МЕТОДИ БОРОТЬБИ З ГІДРОУДАРОМ НА НАСОСНИХ СТАНЦІЯХ

ШЛЯХОМ РАЦІОНАЛЬНОЇ ОБВ'ЯЗКИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

<sup>a</sup> Філія «ЦКПІВЛ» ДУП ДНР «ВОДА ДОНБАСУ», <sup>b</sup> ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** Розглядаються умови та наслідки виникнення гідроудару на насосних станціях. Загальновідомо, що конфігурація обв'язки істотно впливає на стабільність роботи відцентрових насосів, тому дана стаття присвячена пошуку рішення запобігти або мінімізувати наслідки гідроудару ще на стадії проектування або при реконструкції існуючих насосних станцій. Для вирішення поставленої задачі запропоновані схема з пристроям додаткової обвідної лінії, схема для насосів, що починають роботу на відкриту засувку, і схема обв'язки зі скиданням води з напірної лінії у

всмоктувальну. Дані обв'язки технологічного обладнання насосної станції є енергоекспективними, прості в обслуговуванні, оскільки в них немає складних частин або механізмів, успішно працюють незалежно від температури навколошнього середовища, а також при помилковому спрацьовуванні системи..

**Ключові слова:** відцентрові насоси, гідроудар, обв'язка насосів, напірний трубопровід, пожежогасіння, лінія пробного пуску.

ALEKSANDR PAVLUCHENKO <sup>a</sup>, NADEZHDA GRIGORENKO <sup>b</sup>  
METHODS OF COMBATING WATER HAMMER AT PUMPING STATIONS BY  
RATIONAL STRAPPING OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

<sup>a</sup> «TSKIPIVL» Branch of the DPR State Unitary Enterprise «WATER OF DONBASS»,

<sup>b</sup> Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** The conditions and consequences of the occurrence of a water hammer at pumping stations are considered. It is well known that the configuration of the strapping has a significant and often critical impact on the stability of centrifugal pumps, so this article is devoted to finding a solution to prevent or minimize the consequences of a water hammer at the design stage or during the reconstruction of existing pumping stations. To solve this problem, a scheme with an additional bypass line device, a scheme for pumps starting work on a slightly open valve, and a strapping scheme with water discharge from the pressure line into the suction line are proposed. This strapping technological equipment of the pumping station are energy efficient, easy to maintain, since they do not have complex parts or mechanisms, work successfully regardless of the ambient temperature, as well as in case of false triggering of the system.

**Key words:** centrifugal pumps, hydraulic shock, pump strapping, pressure line, fire extinguishing, test start line.

**Павлюченко Александр Сергеевич** – инженер-проектировщик II категории филиала «ЦКИПИВЛ» ГУП ДНР «ВОДА ДОНБАССА». Научные интересы: проектирование систем водоснабжения и водоотведения, насосных станций, очистка сточных вод.

**Григоренко Надежда Ивановна** – кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: проектирование систем водоснабжения и водоотведения, очистка сточных вод.

**Павлюченко Олександр Сергійович** – інженер-проектувальник II категорії філії «ЦКПІВЛ» ДУП ДНР «ВОДА ДОНБАСУ». Наукові інтереси: проектування систем водопостачання і водовідведення, насосних станцій, очищення стічних вод

**Григоренко Надія Іванівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри водопостачання, водовідведення та охорони водних ресурсів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: проектування систем водовідведення, очищення стічних вод

**Pavluchenko Aleksandr** – design engineer grade II at «TSKIPIVL» Branch of the DPR State Unitary Enterprise «WATER OF DONBASS». Scientific interests: design of water supply and water disposal systems, design of pump station, wastewater treatment.

**Grigorenko Nadezhda** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Water Supply, Sanitation and Protection of Water Resources Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: design of water supply and water disposal systems, wastewater treatment.

EDN: JUESSG

УДК 504.3.054:69.05

**А. А. ШЕЙХ**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ СТРОИТЕЛЬСТВА НА ВЕЛИЧИНУ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА**

**Аннотация.** В работе установлено, что рециклинг отходов строительства и демонтажа зданий наиболее эффективно следует производить непосредственно на месте выполнения демонтажных работ, реализуя процесс посредством технологии, включающей их сортировку, измельчение, подготовку, приготовление и использование. Представлен технологический процесс получения вторичного сырья в границах строительной площадки с использованием мобильной щековой дробилки модели Sandvik QJ241. В работе определены значения концентраций пыли, которые образуются на строительной площадке при проведении работ по дроблению отходов строительства с использованием мобильной щековой дробилки. Полученные концентрации позволили определить усредненное значение пыли, привносимое при переработке отходов в границах строительной площадки. Обоснована целесообразность переработки строительных отходов и вовлечение их в цикл строительства, поскольку полученные концентрации по всем рассматриваемым веществам на границе базовой санитарно-защитной зоны и на территории ближайшей жилой застройки не превышают нормативы ПДК.

**Ключевые слова:** отходы строительства, рециклинг, дробление, установка дробильная, загрязнение, атмосферный воздух, расчет рассеивания.

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

На сегодняшний день одним из вариантов решения проблемы дефицита земли является разрушение старых зданий, не находящихся в эксплуатации и занимающих значительные территории. Проведенный анализ статистических данных свидетельствует, что на территории промышленных зон, воинских частей находится огромное количество зданий, которые требуют реконструкции или разрушения с целью освобождения территории. В большинстве случаев восстановление старых зданий является экономически нецелесообразным, поэтому необходимо проводить их почти полное разрушение под новую застройку, в результате разрушения будет образовываться огромное количество строительных отходов, которые необходимо утилизировать. Рециклинг отходов строительства и демонтажа зданий позволяет более рационально использовать невосполнимые природные ресурсы, а также минимизировать экологический ущерб в результате производственной деятельности [1]. Также использование рециклинга может сократить себестоимость строительства, поскольку отходы строительства и сноса становятся достаточно привлекательным ресурсом в условиях восстановления городов. Однако следует учесть, что переработка «на месте», если объект расположен в черте города, может быть затруднена по экологическим требованиям, поскольку при дроблении отходов наблюдается дополнительное привнесение в атмосферных воздух пылевых частиц различной крупности и шумовое загрязнение территории, отведенной под строительство.

### **АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ**

В работах [1, 2] установлено, что применение строительных отходов наиболее эффективно следует производить на месте демонтажных работ, реализуя процесс посредством технологии, включающей их сортировку, измельчение, подготовку, приготовление и использование. В работе [3] обоснована целесообразность использования отходов строительства и демонтажа зданий непосредственно



на месте их образования с учетом получения экологического эффекта, поскольку вторичная переработка строительных отходов позволит решить проблему материального снабжения объекта строительства дешевым сырьем, а также сбережения природных ресурсов.

**Цель:** исследование дополнительного пылевого загрязнения атмосферного воздуха при проведении рециклинга отходов строительства и сноса зданий в границах строительной площадки.

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Проведенный ранее анализ этапов обращения со строительными отходами на стройплощадке показал, что основной вклад в пылевое загрязнение атмосферного воздуха вносят дробильные установки, в процессе эксплуатации которых происходит измельчение отходов до необходимой фракции [3-5]. Очевидно, что осуществление на стройплощадке различных операций, связанных с рециклингом отходов демонтажа и строительства, будет сопровождаться выделением пыли. Все перечисленное выше определило выбор направления исследований – исследование строительной площадки при переработке отходов строительства как источника пылевого загрязнения окружающей природной среды.

Для анализа влияния процесса переработки отходов демонтажа и строительства зданий непосредственно на строительной площадке в работе был выполнен расчет выбросов загрязняющих веществ от работы дробильной установки [3]. В границах строительной площадки планируется установка мобильной щековой дробилки Sandvik QJ241, предназначеннной для производства вторичного щебня. В основу производства вторичного щебня положен процесс механического измельчения отходов на мобильной щековой дробилке Sandvik QJ241. Машина предназначена для уменьшения крупности отходов минерального происхождения (например камня, бетона, гранита, сланцев, кирпича, известняка, железобетона, асфальта) и переработки отходов до определенных размеров. Конечный образующийся продукт – вторичный щебень, применяемый в строительстве и технологических процессах.

Самоходная щековая дробилка – это автономная гусеничная машина, рассчитанная на тяжелые условия работы в карьерах и в строительной области. В машине используется дизельный двигатель, обеспечивающий питание гидравлического силового агрегата и электрических систем машины. Гусеницы, питатели, щеки, конвейеры и все другие рабочие части машины имеют гидравлический привод. Максимальная загрузка мобильной установки определена технической документацией – 225 т/год перерабатываемого сырья. Приёмное отверстие: 1 000×650 мм. Максимальный диаметр кусков строительных отходов составляет 520 мм. Разгрузочная щель – от 50 до 150 мм.

Стадии технологического процесса.

1. Прием и подготовка отходов. Все строительные отходы минерального происхождения для изготовления вторичного щебня при приемке на площадку для складирования проходят входной контроль на соответствие по внешнему виду и степени загрязненности.

2. Измельчение отходов с использованием щековой дробилки, осуществляющей дробление при помощи движения «щек» до получения готовой продукции – вторичного щебня необходимой фракции.

3. Каждая партия готового вторичного щебня проходит выборочный визуальный и измерительный контроль качества.

4. Полученный после дробления в дробилке вторичный щебень складируется в отвал на площадку готовой продукции, расположенную вблизи цеха.

Полученный вторичный щебень может применяться для подсыпки, замены грунта при обратной засыпке котлованов и траншей, рекультивации земель, нарушенных в результате разработки месторождений полезных ископаемых, для благоустройства территории, при строительстве дорожных одежд низких категорий. Прочность щебня характеризуют маркой по дробимости щебня. Далее был проведен анализ воздействия намечаемой деятельности на состояние атмосферного воздуха. На территории площадки проектирования планируется организация 6 неорганизованных источников выбросов: разгрузка и хранение строительных отходов (ист. № 6001), загрузка отходов в дробилку (ист. № 6002), разгрузка и хранение песка (ист. № 6003), работа самой дробилки (ист. № 6004), работа погрузчика (ист. № 6005) и погрузочно-разгрузочная площадка (ист. № 6006). Основными загрязняющими веществами, выделяющимися в атмосферный воздух на стадии эксплуатации проектируемого объекта (щековая дробилка и места хранения строительных отходов и материалов), являются: оксиды азота, оксид углерода, диоксид серы, твердые частицы, пыль неорганическая, бенз/а/пирен, сажа, углеводороды предельные. Полученные результаты расчетов сведены и представлены в таблице 1.

**Таблица 1** – Параметры выбросов загрязняющих веществ

Наименование производства, участка	№ источника	Наименование источников выделения ЗВ	Высота источника, м	Загрязняющее вещество		Количество ЗВ, выбрасываемых в АВ	
				Код	Наименование	г/с	т/год
Площадка и хранение отходов	6001	Площадка и хранение отходов	2	2908	Пыль неорганическая: 70...20 % SiO <sub>2</sub>	0,002	0,011
Загрузка отходов в дробилку	6002	Загрузка отходов в дробилку	4	2908	Пыль неорганическая: 70...20 % SiO <sub>2</sub>	0,004	0,021
Разгрузка и хранение вторичного щебня	6003	Разгрузка и хранение вторичного щебня	2	2908	Пыль неорганическая: 70...20 % SiO <sub>2</sub>	0,016	0,078
Щековая дробилка	6004	Дробление	5	2908	Пыль неорганическая: 70...20 % SiO <sub>2</sub>	0,000	0,001
				301	Азота диоксид	0,212	1,019
				330	Серы диоксид	0,061	0,291
				337	Углерод оксид	0,173	0,829
				328	Сажа	0,009	0,043
Дизельный погрузчик	6005	Работа дизельного погрузчика	5	301	Азота диоксид	0,144	0,692
				330	Серы диоксид	0,041	0,198
				337	Углерод оксид	0,117	0,562
				328	Сажа	0,006	0,029
				2754	Углеводороды	0,033	0,157
				703	Бенз(а)пирен	0,000	0,000
Территория площадки	6006	Автотранспорт	5	301	Азота диоксид	0,001	0,013
				330	Серы диоксид	0,000	0,002
				337	Углерод оксид	0,002	0,019
				328	Сажа	0,0001	0,001
				2754	Углеводороды	0,0003	0,003
Итого						0,8214	3,969

**ИСТОЧНИК № 6001. ПЛОЩАДКА РАЗГРУЗКИ И ХРАНЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ.** Склад временного хранения служит для хранения сырья – строительных отходов в кусковой форме. В течение года из автотранспорта может перегружаться до 300 000 тонн исходного сырья. Выбросы загрязняющих веществ составляют 0,011 т/год.

**ИСТОЧНИК № 6002. ЗАГРУЗКА СТРОИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ В ДРОБИЛКУ.** Загрузка отходов для переработки в щековую дробилку осуществляется дизельным погрузчиком. В течение года дробилка может перерабатывать до 300 000 тонн отходов (максимальная производительность согласно техническим характеристикам). Выбросы загрязняющих веществ составляют 0,021 т/год.

**ИСТОЧНИК № 6003. ПЛОЩАДКА РАЗГРУЗКИ И ХРАНЕНИЯ ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ (ВТОРИЧНОГО ЩЕБНЯ).** Площадка хранения служит для хранения готовой продукции – вторичного щебня. В течение года из дробилки может перегружаться до 300 000 тонн вторичного щебня. Выбросы загрязняющих веществ составляют 0,078 т/год.

**ИСТОЧНИК № 6004. РАБОТА ЩЕКОВОЙ ДРОБИЛКИ.** Щековая дробилка служит для переработки крупнокусковых строительных отходов до мелкой фракции нужного размера. Максимальная производительность дробилки 225 т/час (согласно техническим характеристикам). Работа дробилки осуществляется с использованием дизельного двигателя внутреннего сгорания эксплуатационной мощностью 168 кВт. Загрузка отходов в дробилку осуществляется дизельным погрузчиком. Выгрузка после окончания процесса дробления производится автономно при помощи конвейера, входящего в состав дробилки. Выбросы загрязняющих веществ составляют 2,414 т/год.

**ИСТОЧНИК № 6005. ПОГРУЗЧИК. ПОГРУЗОЧНО-РАЗГРУЗОЧНАЯ ПЛОЩАДКА.** Дизельный погрузчик осуществляет операции по загрузке строительных отходов в щековую дробилку. Работа погрузчика осуществляется с использованием дизельного двигателя внутреннего сгорания эксплуатационной мощностью 114 кВт. Выбросы загрязняющих веществ составляют 1,637 т/год.

**ИСТОЧНИК № 6006. АВТОТРАНСПОРТ. ПОГРУЗОЧНО-РАЗГРУЗОЧНАЯ ПЛОЩАДКА.** На территории производственной площадки предусмотрены площадки для разгрузки сырья (строительных крупнокусковых отходов) и погрузки готовой продукции, для перемещения которых используются грузовые автомобили. Количество грузовых автомобилей в час – 8 ед, в сутки 65 ед. (исходя из годовой программы, рассчитанной по максимальной мощности щековой дробилки). Выбросы загрязняющих веществ составляют 0,038 т/год.

Для оценки воздействия на атмосферный воздух источников выбросов загрязняющих веществ был проведен расчет рассеивания загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы с использованием унифицированной программы расчёта загрязнения атмосферы УПРЗА "ЭКО центр" с учетом предыдущих исследований [2]. Ранее было установлено, что с учетом экологической безопасности переработку строительных отходов и вовлечение их в цикл строительства необходимо выполнять непосредственно до полученного опасного периода, т. е. до 50 дня возведения здания. Полученные расчетным путем величины мощности выбросов вредных веществ, сопоставленные с календарным планом выполнения строительных работ, позволили определить наиболее опасный период строительства с позиции воздействия на атмосферный воздух (с 50 по 70 день) [3]. Поэтому при проведении расчета рассеивания выбросов загрязняющих веществ были учтены удельные выбросы, образующиеся при выполнении работ нулевого цикла. Полученные результаты расчета приземных концентраций загрязняющих веществ сведены в таблице 2.

**Таблица 2 – Результаты расчета приземных концентраций загрязняющих веществ**

Код	Наименование вещества	Максимальные приземные концентрации, доли ПДК на границе	
		СЗЗ	жилой застройки
301	Азота диоксид	0,35	0,32
328	Углерод (сажа)	0,04	0,03
330	Серы диоксид	0,22	0,19
337	Углерод оксид	0,02	0,02
703	Бенз(а)пирен	0,00	0,04
2754	Углеводороды предельные С <sub>11</sub> –С <sub>19</sub>	0,02	0,02
2902	Твердые вещества	0,49	0,22
2908	Пыль неорганическая: 70...20 % SiO <sub>2</sub>	0,32	0,28
6008	Группа суммации (301; 330)	0,57	0,51
6040	Группа суммации (337; 2908)	0,33	0,29

Полученные максимальные приземные концентрации по всем рассматриваемым веществам на границе базовой санитарно-защитной зоны и на территории ближайшей жилой застройки не превышают нормативы ПДК [6]. Максимальные концентрации наблюдаются по азоту диоксиду (код 0301) – 0,35 долей ПДК на границе СЗЗ и 0,32 долей ПДК на границе жилой застройки.

## ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы:

- выявлены основные источники выбросов загрязняющих веществ, образующиеся на строительной площадке в процессе рециклиинга отходов;
- определены валовые и максимально разовые значения выбросов загрязняющих веществ от ненормализованных источников на строительной площадке; наибольшие валовые выбросы имеют загрязняющие вещества – пыль неорганическая: 70...20 %, SiO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> и CO;
- обоснована целесообразность переработки строительных отходов и вовлечение их в цикл строительства до ранее полученного опасного периода, т. е. до 50 дня возведения здания, поскольку полученные максимальные приземные концентрации по всем рассматриваемым веществам на границе базовой санитарно-защитной зоны и на территории ближайшей жилой застройки не превышают нормативы ПДК;
- максимальные концентрации наблюдаются по азоту диоксиду (код 0301) – 0,35 долей ПДК на границе СЗЗ и 0,32 долей ПДК на границе жилой застройки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Королева, Л. П. Вклад рециклинга в неоиндустриальное развитие / Л. П. Королева. – Текст : электронный // Научный журнал НИУ ИТМО. – 2017. – № 2. – С. 29–38. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vklad-retsiklinga-v-neoindustrialnoe-ravvitie-klassifikatsiya-effektov/viewer> (дата публикации: 13.04.2017).
2. Башевая, Т. С. Определение величины эмиссии загрязняющих веществ и установление опасного расстояния для строящихся объектов с различными конструктивными особенностями / Т. С. Башевая, А. А. Шейх // Научно-практический журнал «Строитель Донбасса». – 2020. – № 2(11). – С. 20–26. – Текст : непосредственный.
3. Шейх, А. А. Анализ строительной площадки как источника пылевого загрязнения атмосферного воздуха в период рециклинга отходов и разработка мероприятий по его снижению / А. А. Шейх. – Текст : электронный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2021. – Выпуск 2021-5(151) Инженерные системы и техногенная безопасность. – С. 61–66. – URL: [http://donna.su/publish\\_house/journals/vestnik/2021/vestnik\\_2021-5\(151\).pdf](http://donna.su/publish_house/journals/vestnik/2021/vestnik_2021-5(151).pdf) (дата публикации: 25.10.2021).
4. Кравцова, М. В. Анализ методов утилизации отходов строительства с последующим вовлечением их во вторичный оборот / М. В. Кравцова, А. В. Васильев, А. В. Кравцов. – Текст : электронный // Известия СНЦ РАН. – 2015. – № 4. – С. 804–809. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metodov-utilizatsii-othodov-stroitelstva-s-posleduyuschiim-vovlecheniem-ih-vo-vtorichnyy-oborot/viewer> (дата публикации: 15.11.2015).
5. Хмелевской, Н. А. Эффективность переработки строительных отходов методом рециклинга / Н. А. Хмелевской. – Текст : электронный // Международный журнал «Integral». – 2020. – № 3. – С. 108–116. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnost-pererabotki-stroitelnyh-othodov-metodom-retsiklinga/viewer> (дата публикации: 01.07.2020).
6. Российская Федерация. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе = Method for Calculating Atmospheric Concentration of Hazardous Substances Contained in Industrial Emissions : [утверждён Минприроды России 06 июня 2017 года № 273]. – Текст : электронный // files.stroyinf.ru : [сайт]. – Москва, 2017. – 79 с. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293744/4293744278.htm> (дата публикации: 01.01.2018).

Получена 14.10.2022

Принята 28.10.2022

О. О. ШЕЙХ

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПРОЦЕСУ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ БУДІВНИЦТВА НА  
ВЕЛИЧИНУ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ  
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** У роботі встановлено, що рециклінг відходів будівництва і демонтажу будівель найбільш ефективно слід проводити безпосередньо на місці виконання демонтажних робіт, реалізуючи процес за допомогою технології, що включає їх сортування, подрібнення, підготовку, приготування і використання. Представлений технологічний процес отримання вторинної сировини в межах будівельного майданчика з використанням мобільної щокової дробарки моделі Sandvik QJ241. У роботі визначено значення концентрацій пилу, які утворюються на будівельному майданчику при проведенні робіт з дроблення відходів будівництва з використанням мобільної щокової дробарки. Отримані концентрації дозволили визначити усереднене значення пилу, що привноситься при переробці відходів в межах будівельного майданчика. Обґрутовано доцільність переробки будівельних відходів та застосування їх до циклу будівництва, оскільки отримані концентрації з усіх розглянутих речовина на межі базової санітарно-захисної зони та на території найближчої житлової забудови не перевищують нормативи ГДК.

**Ключові слова:** відходи будівництва, рециклінг, дроблення, установка дробильна, забруднення, атмосферне повітря, розрахунок розсіювання.

ALEXANDRA SHEIKH

ANALYSIS OF THE IMPACT OF THE PROCESS OF PROCESSING  
CONSTRUCTION WASTE ON THE AMOUNT OF ATMOSPHERIC AIR  
POLLUTION

**Abstract.** It is established in the work that recycling of construction and dismantling waste of buildings should be carried out most effectively directly at the site of dismantling works, implementing the process through technology that includes their sorting, grinding, preparation, preparation and use. The technological process of obtaining secondary raw materials within the boundaries of the construction site using a mobile jaw crusher model Sandvik QJ241 is presented. The paper defines the values of dust concentrations that are formed on the construction site during the crushing of construction waste using a mobile jaw crusher.

The obtained concentrations allowed us to determine the average value of dust introduced during waste processing within the boundaries of the construction site. The expediency of processing construction waste and involving them in the construction cycle is justified, since the concentrations obtained for all substances under consideration at the border of the basic sanitary protection zone and on the territory of the nearest residential development do not exceed the MPC standards.

**Key words:** construction waste, recycling, crushing, crushing plant, pollution, atmospheric air, dispersion calculation.

**Шейх Александра Александровна** – ассистент кафедры техносферной безопасности ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: повышение экологической безопасности в строительстве; оценка уровня воздействия на атмосферный воздух процесса возведения зданий.

**Шейх Олександра Олександровна** – асистент кафедри техносферної безпеки ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: підвищення екологічної безпеки в будівництві; оцінка рівня впливу на атмосферне повітря процесу зведення будівель.

**Sheikh Alexandra** – Assistant, Technosphere Safety Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: improvement of environmental safety in construction; assessment of the level of impact on the atmospheric air of the process of construction of buildings.

EDN: КВССНР

УДК 504.064.4

**Т. С. БАШЕВАЯ**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ**

**Аннотация.** В статье проиллюстрирована актуальность проблемы твёрдых коммунальных отходов для государства и всего мирового сообщества. Сформулированы основные проблемные моменты в решении вопроса ТКО. Данна сравнительная характеристика способов обращения с коммунальными отходами в разных странах и приведена зависимость выбора способа утилизации от экономического благополучия государства. Приведены данные, характеризующие способы обращение с отходами ТКО в РФ и ДНР: количество отходов, поступающих в специально отведенные места, и объекты размещения отходов, повторно используемых в качестве материальных или энергетических ресурсов. Проанализирован компонентный состав отходов с позиции применимости технологий по каждому компоненту. Изложены применяемые в настоящее время подходы для решения проблем ТКО. Определены основные направления деятельности для минимизации воздействия ТКО на окружающую среду.

**Ключевые слова:** охрана окружающей среды, обращение с отходами, твердые коммунальные отходы, сортировка, сбор, рециклиинг.

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Первая ассоциация, возникающая на слово «отходы» – это «проблема», «неразрешаемая проблема», а в некоторых зарубежных источниках встречается словосочетание «проклятие нашего времени». Увеличение темпов образования и накопления отходов как «неустранимое следствие цивилизационного процесса» давно перестало быть проблемой отдельно взятой страны и превратилось в глобальную проблему и все более опасную угрозу окружающей среде. Человек в процессе своей жизнедеятельности ежедневно образует отходы. По результатам анализа Всемирного банка в среднем один житель планеты Земля производит 0,75 кг отходов в день. Для разных стран показатели колеблются от 0,11 до 4,54 кг на душу населения в день [1]. Среднестатистический гражданин Китая производит около 0,4 кг/день; гражданин РФ производит около 1,1 кг/день; гражданин Норвегии – 1,25 кг/день; гражданин Финляндии – 1,4 кг/день, гражданин ОАЭ – 1,6 кг/день, гражданин Израиля – 1,8 кг/день; гражданин Швеции – 2,0 кг/день. Один из самых больших показателей образования отходов в Мире у граждан США 2,2 кг/день. Больше всего мусора производят жители Исландии: 4,3 кг в день. При количестве населения на планете на 1 января 2022 года 7,95 млрд человек можно предположить, что ежедневно образуется около 6 миллионов тонн отходов. А учитывая тот факт, что население планеты Земля стремительно увеличивается и в конце текущего десятилетия ожидается достижения показателя 9 млрд жителей планеты, то можно сделать вывод – ситуация с отходами катастрофическая. Конечно же, при анализе темпов прироста количества отходов в определенной стране необходимо учитывать уровень рециклинга и повторного использования отходов в качестве вторичных материальных ресурсов или энергии. Установлено, что увеличение объемов отходов коррелирует с темпами роста национального ВВП (Евросоюз предпринимает значительные усилия, чтобы эти объемы росли на 15 % медленнее ВВП). В среднем по «низкодоходным» странам в городах собирается 30...60 % отходов, по «среднедоходным» – 50...80 % [2]. Обостряющимся «мусорным кризисом» в той или иной степени поражены все страны Мира.



## АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Проблемой твердых коммунальных отходов активно занимаются ученые РФ, стран Европы, Америки и Азии многие десятилетия. В нашей стране проблемой коммунальных отходов занимаются такие ученые как Г. Я. Дрозд, М. Ш. Орлов, А. А. Курочкина, А. А. Чалганова, И. А. Соломин, Е. Ю. Негуляева, Н. Н. Слюсарь, В. Г. Ларионов, Г. М. Золотарев и многие другие. В работах научных деятелей изучены вопросы компонентного и морфологического состава ТКО [3, 4]; вопросы правового регулирования и ответственных за решение данной проблемы [5, 6, 7]; изложены особенности транспортировки и логистики сбора ТКО [8, 9]; предложены эффективные методики сортировки ТКО [10, 11]; разработаны инновационные технологии переработки ТКО или их отдельных компонентов (пластик, макулатура, стекло, биоразлагаемые отходы) [12, 13, 14, 15]. Весьма интересным представляется такое явление, как формирование экологического мировоззрения в направлении «Zero waste»: эко-активисты даже издали ряд книг для повышения культуры населения в вопросах обращения с коммунальными отходами. И, несмотря на все эти старания, при такой степени популярности и изученности вопроса проблема твердых коммунальных отходов по – прежнему актуальна и болезненна для представителей государственного управления и особенно для городских жителей.

**Цель:** изучение подходов к решению проблемы твердых коммунальных отходов и выработка основных направлений деятельности для минимизации воздействия ТКО на окружающую среду.

### ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Источниками ТКО являются как домовые хозяйства, так и деятельность производств и предприятий по выполнению работ и оказанию услуг. Для защиты окружающей среды в сфере обращения с твердыми коммунальными отходами есть четыре основные пути (рисунок 1).



**Рисунок 1** – Пути минимизации воздействия ТКО на окружающую среду.

В соответствии с Федеральным классификационным каталогом отходов (ФККО) ТКО отнесены к IV классу опасности (малоопасные). Это многокомпонентный отход на 2/3 состоящий из органических отходов, бумаги и полимерных продуктов (рисунок 2). Анализ компонентного состава ТКО показывает, что более 80 % по массе этих отходов могут быть утилизированы, для этого разработаны соответствующие материалу компонента технологии.

В 2014 г. был принят Федеральный закон № 458-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон "Об отходах производства и потребления"», который ознаменовал собой начало реформы обращения с твердыми коммунальными отходами, которая получила существенное развитие с 1 января 2019 года при запуске «мусорной реформы» (официальное название – реформа обращения с отходами производства и потребления в Российской Федерации). Основная сформулированная цель данной реформы – ликвидация незаконных свалок, переход на разделенный сбор мусора, сортировка и переработка отходов: к 2040 году 36 % бытового мусора должно использоваться в качестве ВМР. Однако данные годовых статистических отчетов РФ свидетельствуют о том, что после сбора ТКО только 27 % поступили на специально организованные объекты сортировки и лишь 7 % были в дальнейшем переработаны (рисунок 3). 73 % всей массы отходов поступили на полигоны ТКО при темпах роста объемов ТКО



Рисунок 2 – Компонентный состав отходов ТКО с указанием рециклируемости каждого компонента.

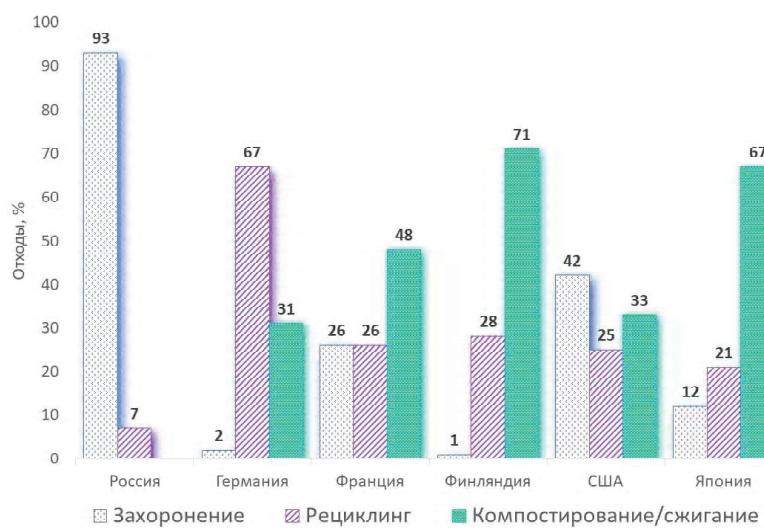


Рисунок 3 – Сравнительная характеристика способов обращения с ТКО.

(1...2 % в год). И, как следствие, в конце сентября 2020 года Счетная палата РФ сообщила, что ситуация с официальными полигонами близка к критической.

Если рассматривать текущую ситуацию по данному направлению в ДНР, то согласно данным Госкомэкополитики на территории ДНР от домохозяйств за год образовывается 612 тыс. тонн отходов. При годовом уровне рециклинга 5,7 % ситуация на полигонах ДНР аналогична ситуации в РФ – близка к критической: полигоны, расположенные в населенных пунктах с наибольшим количеством населения, заполнены на 50...85 % от проектной вместимости: в Макеевке на 85 %, в Донецке – на 75 % и на 45 %; в Горловке – на 50 %. По состоянию на начало 2022 года на территории Республики действуют 7 специально отведенных мест и объектов размещения отходов (СОМОРО) для захоронения коммунальных отходов. Следует отметить, что в 2023 году ДНР присоединится к реализации «мусорной реформы» РФ.

Выявлено, что уровень переработки отходов прямо коррелируется с уровнем дохода населения и развития экономики. Достигнутые результаты 60...70 % по переработке ТКО для Германии, Австрии, Бельгии, Швейцарии и Швеции отличаются от уровня Сербии, Турции, Словакии и Мальты, для которых показатель рециклинга составляет 2...10 %. Наименьший процент переработки отмечен в странах Южной Азии. Страны с низким уровнем дохода чаще всего используют для накопления ТКО открытые свалки: 93% отходов располагаются на свалках в странах с низким уровнем дохода и только 2 % – в странах с высоким уровнем дохода [2]. Наивысший уровень компостирования или сжигания отходов в странах Северной Америки (США, Канада) – 33 %. В Европе и Восточной Азии активнее всего используется сжигание. В Японии ТКО не компостируют, а 67 % отходов перерабатывается методом сжигания (рисунок 3).

Показатель переработки и повторного использования отходов напрямую зависит от правильной организации сбора и сортировки отходов. Предприняты меры для стабилизации проблемы ТКО на государственном уровне. Чтобы устранить хаотичность в системе сбора и транспортировки ТКО до СОМОРО, а, главное, назначить ответственных за обращение с коммунальными отходами, в законе «Об отходах производства и потребления» ввели понятие «региональный оператор ТКО» и наделили его правом на сбор, транспортирование, обработку, утилизацию, обезвреживание, захоронение твердых коммунальных отходов на территории объектов РФ. В итоге это не повлияло на уровень рециклинга отходов и уменьшение воздействия на окружающую среду, а привело к тому, что от места сбора до места захоронения ТКО транспортируют 15 утвержденных на территории РФ региональных операторов. Правительством РФ в 2018 г. для регулирования вопросов формирования, ведения и содержания реестра мест (площадок) размещения ТКО дополнительно было принято Постановление № 1039 «Об утверждении Правил обустройства мест (площадок) накопления твердых коммунальных отходов и ведения их реестра».

К решению проблемы ТКО, аналогично опыту зарубежных стран, активно начали подключаться общественные организации, волонтерские движения и неравнодушные к экологическим проблемам граждане: на территории РФ во многих городах действует экологическое движение «Раздельный Сбор» (<https://rsbor.ru/>), целью которого является внедрение раздельного сбора отходов для улучшения состояния окружающей среды и качества жизни человека. В рамках этого движения в городах проходят ежемесячные акции по раздельному сбору отходов металла, стекла, бумаги, пластиковых бутылок и опасных отходов у населения и последующей передачей рассортированных отходов партнерам – переработчикам и заготовителям вторсырья. В Санкт-Петербурге для стимулирования населения к раздельному сбору ТКО функционирует «экотакси» – это сервис, который вывозит раздельно собранный мусор прямо из дома/офиса. Стоимость услуги 300 руб. за выезд. В городах РФ через удобное мобильное приложение появился сервис «Явынесу» – это первый сервис по выносу бытового, крупногабаритного и строительного мусора из квартир, офисов и частных домов.

## ВЫВОДЫ

Можно сделать заключение о многообразии подходов к решению проблемы ТКО. Все предпринимаемые действия и установленные законодательно нормы позволяют лишь частично снизить нагрузку на окружающую среду, но не решить проблему. Проблема ТКО многопричинна и препятствия к ее устраниению находятся на всех этапах жизненного цикла коммунальных отходов. Во-первых, в настоящий момент нетнятых экономических стимулов для организации комплексов по переработке отходов ТКО, но при этом есть ощущимые бюрократические преграды, и, как следствие, собственникам отходов проще передать их на захоронение, чем утилизировать. Во-вторых, отсутствует как положительный, так и отрицательный опыт экономического стимулирования населения к минимизации количества отходов и их правильному сбору. В качестве экономического рычага можно только отметить только ст. 8.2. «Несоблюдение требований в области охраны окружающей среды при обращении с отходами производства и потребления» «Кодекса Российской Федерации об административных правонарушениях». В-третьих, низкий уровень экологической культуры населения, что в сочетании с капиталистическим стремлением продать как можно больше упаковки и как можно меньше самого товара приводит к образованию дополнительных необоснованных объемов коммунальных отходов.

Наиболее правильный подход при обращении с отходами ТКО можно описать формулой ЭТБО = = f(РГ; РС; ПО; В), где РГ – экологически разумная генерация ТКО; РС – правильно организованный раздельный сбор отходов; ПО – переработка ТКО с получением материальных или энергетических ресурсов; В – показатель экологической культуры. Эффективное применение этой формулы возможно исключительно при содействии государственных структур, эффективной работы законодательных

актов, снижения бюрократического давления на реализаторов мероприятий в сфере обращения с ТКО, а также осознании населением и каждым гражданином экологической ответственности за состояние окружающей среды и благополучие своего (дом) в будущем.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколова, О. Г. Формирование модели управления твердыми коммунальными отходами / О. Г. Соколова, М. В. Полежаева, Е. В. Чухарева. – DOI: 10.24411/2071-6435-2019-10095. – Текст : электронный // ЭТАП: экономическая теория, анализ, практика. – 2019. – № 3. – С. 130–143. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_38489379\\_26130349.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_38489379_26130349.pdf) (дата обращения: 11.03.2021). – EDN: ZXVBPV.
2. Никуличев Ю. В. Управление отходами. Опыт Европейского союза. Аналитический обзор / Ю. В. Никуличев ; РАН. ИНИОН. Центр науч.-инф orm. исслед. глоб. и регионал. пробл. Отд. проб. европ. безопасности. – Москва : ЮНИОН-РАН, 2017. – 55 с. – (Сер.: Социальные и экономические проблемы глобализации). – ISBN 978-5-248-00857-5. – Текст : непосредственный.
3. Курочкина, А. А. Исследование показателей динамики и структуры твердых отходов в Российской Федерации / А. А. Курочкина, Е. Е. Петрова, Т. В. Бикезина . – Текст : электронный // Глобальный научный потенциал. – 2020. – № 4(109). – С. 193–199. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_43100989\\_15903451.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_43100989_15903451.pdf) (дата обращения: 14.04.2021). – EDN: QUYANC.
4. Лихачева, О. И. Компонентный состав твердых коммунальных отходов – основа для принятия решений по обращению с отходами / О. И. Лихачева. – Текст : электронный // Вузовская наука – регионам : материалы XVI Всероссийской научной конференции с международным участием, Вологда, 27 февраля 2018 года. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2018. – С. 141–144. – URL: <https://cyber-leninka.ru/article/n/sovershenstvovanie-deystvuyushey-sistemy-obrascheniya-s-otходami-za-schet-aktualizatsii-territorialnyh-schem-obrascheniya-s> (дата обращения: 19.09.2022). – EDN: YZCAEP.
5. Галаюра, В. С. Управление в сфере обращения с твердыми коммунальными отходами: современное состояние / В. С. Галаюра, Ю. И. Лисина, Д. В. Рябова. – Текст : непосредственный // The World of Science Without Borders. – 2022. – 11 февраля 2022 года. – С. 53–57.
6. Соломин, И. А. Организация системы управления муниципальными органическими отходами / И. А. Соломин. – DOI 10.34677/1997-6011/2019-2-60-65. – Текст : электронный // Природообустройство. – 2019. – № 2. – С. 60–65. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_41264313\\_19296853.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_41264313_19296853.pdf) (дата обращения: 11.09.2022). – EDN: GDICRE.
7. Колб, А. А. Определение понятия отходов, в том числе твердых коммунальных отходов, как объекта межотраслевого законодательного регулирования / А. А. Колб. – Текст : электронный // Аграрное и земельное право. – 2018. – № 12(168). – С. 15–20. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_37128-516\\_92487771.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37128-516_92487771.pdf) (дата обращения: 23.08.2022). – EDN: YZZQST.
8. Организация и управление твердыми коммунальными отходами города в рамках экологического менеджмента / В. Г. Ларионов, М. Н. Павленков, П. М. Воронин [и др.]. – 4-е издание. – Москва : Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2021. – 366 с. – ISBN 978-5-394-04156-3. – Текст : непосредственный.
9. Генсон, Е. М. Оптимизация работы парка специализированных автомобилей для сбора и транспортирования твердых коммунальных отходов / Е. М. Генсон. – Текст : электронный // Технико-технологические проблемы сервиса. – 2020. – № 3(53). – С. 38–41. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-raboty-parka-spetsializirovannyh-avtomobiley-dlya-sbora-i-transportirovaniya-tverdyh-kommunalnyh-otodov/viewer> (дата обращения: 15.08.2022). – EDN: FNPEKG.
10. Карелин, А. Е. Обзор систем сортировки твердых коммунальных отходов / А. Е. Карелин, А. В. Кожемяченко, М. А. Лемешко. – Текст : электронный // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 7(79). – С. 9–16. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_46459793\\_40313699.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_46459793_40313699.pdf) (дата обращения: 07.09.2022). – EDN: NJMBXX.
11. Золотарев, Г. М. Раздельный сбор отходов – принципиально новая экологически чистая технология сбора, перевозки, сортировки и захоронения твердых коммунальных отходов / Г. М. Золотарев. – Текст : непосредственный // Градостроительство. – 2015. – № 6(40). – С. 14–19.
12. Соломин, И. А. Состав и свойства твердых коммунальных отходов, учитываемые при выборе технических методов обращения с отходами / И. А. Соломин, В. И. Афанасьев. – Текст : электронный // Природообустройство. – 2017. – № 3. – С. 82–90. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_29444345\\_27396523.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_29444345_27396523.pdf) (дата обращения: 11.09.2022). – EDN: YUIPGB.
13. Золотарев, Г. М. Инновационная технология обращения с твердыми коммунальными отходами / Г. М. Золотарев. – Текст : непосредственный // Экологический вестник России. – 2015. – № 10. – С. 25–31.
14. Терлеева, А. В. Обращение с органическими твёрдыми коммунальными отходами в странах Латинской Америки: современное состояние и проблемы развития отрасли / А. В. Терлеева. – DOI: 10.14530/reg.2021.6.116. – Текст : электронный // Регионалистика. – 2021. – Т. 8. – № 6. – С. 116–131. – URL: <http://regionalistica.org/images/2021/6/2021-06.116.pdf> (дата обращения: 11.09.2022). – EDN: SYLPMS.
15. Патент № 2677297 С1 Российская Федерация, МПК C10L 5/46, C10L 5/08, C10L 5/40. Способ переработки твердых коммунальных отходов и устройство для переработки твердых коммунальных отходов : № 2018139386 : заявл. 08.11.2018 : опубл. 16.01.2019 / Костин М. Н., Бугров Ю. Е. – 11 с. – URL: <https://patenton.ru/patent/RU2677297C1.pdf> (дата обращения: 11.03.2022). – Текст : электронный.

16. Дрозд, Г. Я. Новые подходы к обращению с отходами, и их реализация на примере ЛНР (окончание следует) / Г. Я. Дрозд . – Текст : непосредственный // Экологический вестник России. – 2019. – № 11. – С. 52–57.

Получена 25.09.2022

Принята 28.10.2022

Т. С. БАШЕВА

АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ТВЕРДИХ  
КОМУНАЛЬНИХ ВІДХОДІВ

ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** У статті проілюстровано актуальність проблеми твердих комунальних відходів для держави та всієї світової спільноти. Сформульовано основні проблемні моменти у вирішенні питання ТКО. Дано порівняльну характеристику способів поводження з комунальними відходами в різних країнах та наведено залежність вибору способу утилізації від економічного благополуччя держави. Наведено дані, що характеризують способи поводження з відходами ТКО в РФ та ДНР: кількість відходів, що надходять у спеціально відведені місця та об'єкти розміщення відходів, кількість повторно використовуваних відходів як матеріальні або енергетичні ресурси. Проаналізовано компонентний склад відходів з позиції застосування технологій по кожному компоненту. Викладено застосувані нині підходи на вирішення проблем ТКО. Визначено основні напрямки діяльності для мінімізації впливу ТКО на довкілля.

**Ключові слова:** охорона навколошнього середовища, поводження з відходами, тверді комунальні відходи, сортuvання, збирання, рециклінг.

TATIANA BASHEVAYA

ANALYSIS OF WAYS TO SOLVE THE PROBLEM OF MUNICIPAL SOLID  
WASTE

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** The article illustrates the relevance of the problem of municipal solid waste for the state and for the entire world community. The main points in solving the problem of municipal waste are formulated. A comparative description of the ways of handling municipal waste in different countries is given. The dependence of the disposal method on the economic well-being of the state is given. Data are given that characterize the methods of MSW waste management in the Russian Federation and the DPR: the amount of waste entering specially designated places and waste disposal facilities, the amount of waste that is reused as material or energy resources. The component composition of the waste and the likelihood of using processing technologies for each component are analyzed. The approaches that are currently used in solving the problems of MSW are outlined. The main activities for minimizing the impact of MSW on the environment have been identified.

**Key words:** environmental protection, waste management, municipal solid waste, sorting, picking, recycling.

**Башевая Татьяна Сергеевна** – кандидат технических наук, доцент; заведующая кафедрой техносферной безопасности ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: управление отходами и технологии рециклирования как методы обеспечения экологической безопасности и устойчивого развития; повышение экологической безопасности в строительстве и коммунальном хозяйстве.

**Башева Тетяна Сергіївна** – кандидат технічних наук, доцент; завідувач кафедри техносферної безпеки ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: управління відходами та технології рециклінгу як методи забезпечення екологічної безпеки і сталого розвитку; підвищення екологічної безпеки в будівництві і комунальному господарстві.

**Bashevaya Tatiana** – Ph. D. (Eng.), Professor, Head of Technosphere Safety Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: waste management and recycling technologies as methods of ensuring environmental safety and sustainable development; improving environmental safety in construction and municipal services.

EDN: KILCSN

УДК 504.064.4

**А. К. КРАЛИН, Д. А. МАКЕЕВА, Д. Г. АСЕЕВ**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **МИНИМИЗАЦИЯ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРИ МЕХАНИЗИРОВАННОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПРОТИВОГОЛОЛЕДНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Аннотация.** Данная работа посвящена исследованиям, связанным с рационализацией распределения противогололёдного материала по поверхности проезжей части дорог. Рассматриваются вопросы, относящиеся к области зимнего содержания автомобильных дорог общего пользования и экологической безопасности. Определены необходимые размеры частиц одного из самого распространенного противогололедного материала используемого в технологическом процессе механизированного распределения по поверхности проезжей части в нашем регионе, гранулированного шлака. Установлены связи между основными параметрами технологического процесса механизированного распределения противогололедного материала и компонентов противогололедных смесей. Установлена зависимость величины скорости равномерного движения от размера зерен гранулированного шлака. Определено значение максимальной скорости частицы в момент отрыва от распределительного диска в зависимости от частоты вращения распределительного диска и его размеров.

**Ключевые слова:** кологическая безопасность, городское хозяйство, противогололёдные фрикционные материалы, сыпучий материал.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Минимизация антропогенного воздействия на окружающую среду в контексте применения противогололёдных материалов может проявляться в рационализации распределения этих материалов по проезжей части дорог и недопущению попадания его на другие элементы – обочину, бровки, откосы, кюветы.

Чёткое, дозированное, определённое для конкретных условий распределение противогололёдного материала позволит избежать использования его избыточного количества, что в свою очередь снизит воздействие на растительность, почвы и впоследствии на воды. В случае использования химических или комбинированных противогололёдных материалов снижение их избыточного количества естественным образом приведёт к снижению степени воздействия на элементы окружающей среды химических соединений. Для определения оптимального количества материала, которое обеспечит максимальный противогололёдный эффект при минимальных последствиях воздействия на окружающую среду необходимо оптимизировать процесс распределения материала по поверхности проезжей части. Речь идёт об автоматизированном распределении. Изложенные в данной работе исследования тесно связаны с опубликованными ранее авторами результатами работы о вопросе повышения уровня экологической безопасности городского хозяйства путём повторного использования противогололёдных фрикционных материалов путём оптимального использования машин и оборудования для реализации этапа классификации материала для повторного использования [12].

**Целью работы** является выявление и анализ особенностей процесса распределения ПГМ на проезжих частях механизированным способом в целях минимизации антропогенного воздействия на окружающую среду.

**Объект исследования** – процессы распределения противогололедных материалов механизированным способом на проезжих частях дорог общего пользования.



**Предмет исследования** – технологические характеристики машин, применяемых при механизированном распределении противогололедных материалов на проезжих частях дорог общего пользования.

## ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ

Проанализированы нормативные документы и научные труды в области техносферной безопасности в области зимнего содержания автомобильных дорог [5, 6, 7, 11, 14, 15, 16, 19, 20].

Вопросы работ с сыпучими материалами отражены в трудах таких учёных как В. М. Авдохин, А. А. Аврамов, В. И. Баловнев, В. Я. Борщев, О. С. Горфин, Ю. И. Гусев, О. И. Дроздова, В. А. Перов, М. А. Промтов, А. С. Тимонин, Д. О. Скобелев, В. А. Старцев, А. А. Шестopalов [3, 4, 8, 9, 18, 21] и M. J. Kreder, J. Alvarenga, P. Kim, Aizenberg J. Design [1]. Вопросы анализа экологического и социо-экологического воздействия на окружающую среду и решения проблем отходов дорожно-автомобильного комплекса активно исследуются и представлены в работах Л. А. Аликаевой, С. П. Колодия, А. В. Бека, В. В. Челнокова [23].

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Одним из самых распространенных фрикционных противогололедных материалов (ПГМ) для нашего региона может служить гранулированный шлак [12]. Для определения зависимостей между основными параметрами технологического процесса распределения ПГМ по поверхности дороги воспользуемся физико-механическими свойствами этого материала: диаметр частиц гранулированного шлака  $d = 1\dots14$  мм; плотность гранулированного шлака  $\rho_0 = 0,0029$  гр/мм<sup>2</sup> [6].

Так как ширина посыпки  $B$  является функцией скорости отрыва частицы материала от кромки диска, то невыгодно повышать скорость движения частицы до величины, превышающей скорость равномерного движения, так как после отделения от диска она будет испытывать повышенное сопротивление воздуха [8].

Для определения величины скорости равномерного движения частиц ПГМ необходимо определить массу частицы фрикционного ПГМ  $m$ , (гр), её объем  $V$ , (мм<sup>3</sup>), значение площади лобового сечения  $S$ , (м<sup>2</sup>).

Объем частицы ПГМ определяем по формуле:

$$V = \frac{4}{3} \times \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^3, \text{ мм}^3, \quad (1)$$

где  $d$  – диаметр частицы ПГМ, мм.

Значение площади лобового сечения определим по следующей зависимости:

$$S = \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2, \text{ м}^2. \quad (2)$$

Значение массы частицы ПГМ определяем по следующей зависимости:

$$m = V \times \rho, \text{ гр}, \quad (3)$$

где  $V$  – объем частицы ПГМ, мм<sup>3</sup>;

$\rho$  – плотность, применяемого ПГМ, гр/мм<sup>2</sup>.

Величину скорости равномерного движения частицы определим на выражению [8]:

$$\nu = \sqrt{\frac{m}{k_e \times S}}, \text{ м/с}, \quad (4)$$

где  $k_e$  – коэффициент обтекания зерен, зависящий от формы зерна, размеров и скорости, принимаем  $k_e = 0,343$ ;

$S$  – площадь лобового сечения (проекция преобладающей фракции на плоскость, перпендикулярную направлению скорости  $\nu$ ), м<sup>2</sup>.

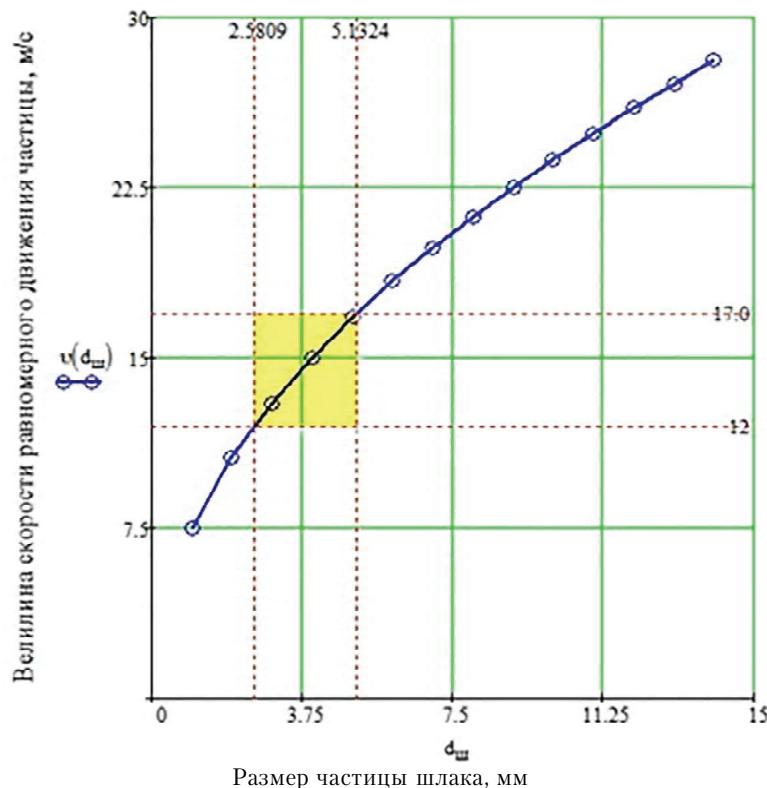
Результаты расчетов значений массы, объема и площади лобового сечения частиц фрикционного ПГМ и величины скорости равномерного движения частицы приведены в таблице 1.

**Таблица 1** – Масса, объем и площади лобового сечения частиц трения ПГМ

Диаметр частицы ПГМ, мм	Объем частицы ПГМ, $V$ , ( $\text{мм}^3$ )	Значение площади лобового сечения частицы ПГМ, $S$ , ( $\text{м}^2$ )	Масса частицы ПГМ, $m$ (гр)	Величина скорости равномерного движения частицы ПГМ, $v$ , ( $\text{м}^2$ )
1	0,524	$7,854 \times 10^{-7}$	0,015	7,508
2	4,189	$3,142 \times 10^{-6}$	0,121	10,617
3	14,137	$7,069 \times 10^{-6}$	0,41	13,004
4	33,51	$1,257 \times 10^{-5}$	0,972	15,015
5	65,45	$1,963 \times 10^{-5}$	1,898	16,788
6	113,097	$2,827 \times 10^{-5}$	3,28	18,39
7	179,594	$3,848 \times 10^{-5}$	5,208	19,863
8	268,083	$5,027 \times 10^{-5}$	7,774	21,235
9	381,704	$6,362 \times 10^{-5}$	11,069	22,523
10	523,599	$7,854 \times 10^{-5}$	15,184	23,741
11	696,91	$9,503 \times 10^{-5}$	20,21	24,9
12	904,779	$1,131 \times 10^{-4}$	26,239	26,007
13	$1,15 \times 10^3$	$1,539 \times 10^{-4}$	33,36	27,069
14	$1,437 \times 10^3$	$1,539 \times 10^{-4}$	41,666	28,091

В работе [8] приведен диапазон значений величины скорости равномерного движения частиц в воздухе.

Определив зависимость величины скорости равномерного движения частицы в воздухе от размера частицы, которая изображена на рисунке 1, выделили прямоугольную зону, обозначающую граничные значения диапазона оптимальных значений величины скорости равномерного движения от 12 до 17 м/с.

**Рисунок 1** – Зависимость величины скорости равномерного движения от размера частиц гранулированного шлака.

Это позволило установить размеры частиц фрикционного материала, которые необходимо использовать для контролируемого распределения ПГМ. Размеры частиц гранулированного шлака определяется диапазоном от 2,6 до 5,1 мм. В настоящее время используют гранулированный шлак со всеми возможными фракциями, величина которых равна от 1 до 14 мм. Это означает, что размерный ряд размера частиц, необходимых в качестве ПГМ, резко сокращается. Это в свою очередь ужесточает требования к фракционному составу применяемого материала. Применяемый материал необходимо классифицировать по фракциям и выделять требуемую.

В любой момент скорость вращательного движения частицы может рассматриваться как скорость той точки диска, в которой она находится. В момент отрыва частицы от диска ее скорость будет равна его максимальной скорости, а именно [8]:

$$v_o = \frac{2\pi \times R \times n}{60}, \text{ м/с,} \quad (5)$$

где  $R$  – радиус распределительного диска, м;

$n$  – частота вращения распределительного диска, об/мин.

Для выполнения расчетов зададимся несколькими значениями наиболее часто применяемых диаметров распределительных дисков. Наиболее часто применяемые диаметры распределительных дисков от 0,4 до 0,6 м. В расчетах применяем и промежуточные значения диаметров распределительных дисков с шагом 0,05 м.

Частоты вращения для определения скорость частицы в момент отрыва от распределительного диска принимаем равными от 350 до 850 об/мин с шагом 50 об/мин.

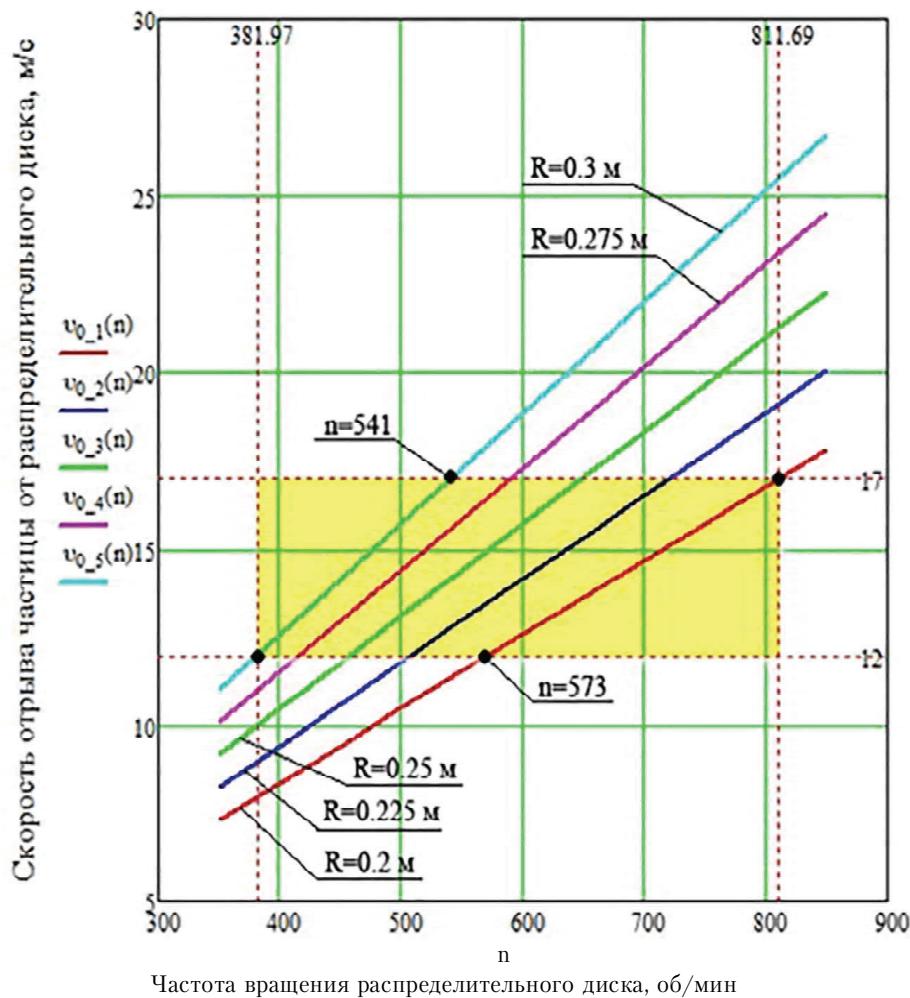
Значения максимальной скорости полета частицы в момент отрыва от распределительного диска радиусом  $R_1 = 0,2$  м,  $R_2 = 0,225$  м,  $R_3 = 0,25$  м,  $R_4 = 0,275$  м,  $R_5 = 0,3$  м с различными частотами вращения приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения максимальных скоростей полета частиц ПГМ

Частота вращения распределительного диска, об/мин	Максимальная скорость полета частицы, (м/с), в момент отрыва от распределительного диска радиусом (м)				
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$
350	7,33	8,247	9,163	10,079	10,996
400	8,378	9,425	10,472	11,519	12,566
450	9,425	10,603	11,781	12,959	14,137
500	10,472	11,781	13,09	14,399	15,708
550	11,519	12,959	14,399	15,839	17,279
600	12,566	14,137	15,708	17,279	18,85
650	13,614	15,315	17,017	18,719	20,42
700	14,661	16,493	18,326	20,159	21,991
750	15,708	17,671	19,635	21,598	23,562
800	16,755	18,85	20,944	23,038	25,133
850	17,802	20,028	22,253	24,478	26,704

Приведенные в таблице 2 значения величины скорости частицы в момент отрыва от распределительного диска желтым цветом выделены значения скоростей полета частиц, характерных для гранулированного шлака с учетом величины скорости равномерного движения частицы. Анализируя полученные результаты, очевидно, что применение частоты вращения вне выделенного диапазона придаст частице ПГМ недостаточную или наоборот избыточную скорость полета, которая выходит за пределы величины скорости равномерного движения частицы. После отделения частицы от диска в этом случае она будет испытывать повышенное сопротивление воздуха. Кроме того, чрезмерные скорости разбрасывания частиц могут являться причиной несчастных случаев и повреждений транспорта.

На рисунке 2 представлена зависимость скорости отрыва частицы от распределительного диска и частоты его вращения.



**Рисунок 2** – Зависимость скорости отрыва частицы от распределительного диска и частоты его вращения.

Обозначив на графике предельные значения величин равномерной скорости движения частиц ПГМ, получим предельные значения частот вращения распределительных дисков в зависимости от их радиусов, а именно:

- диск радиусом  $R_1 = 0,2 \text{ м}$ . Предельное значение частоты вращения распределительного диска для частиц гранулированного шлака размером от 2,5 до 5,0 мм равно от 573 до 812 об/мин;
- диск радиусом  $R_2 = 0,225 \text{ м}$ . Предельное значение частоты вращения распределительного диска для частиц гранулированного шлака размером от 2,5 до 5,0 мм равно от 509 до 722 об/мин;
- диск радиусом  $R_3 = 0,25 \text{ м}$ . Предельное значение частоты вращения распределительного диска для частиц гранулированного шлака размером от 2,5 до 5,0 мм равно от 458 до 650 об/мин;
- диск радиусом  $R_4 = 0,275 \text{ м}$ . Предельное значение частоты вращения распределительного диска для частиц гранулированного шлака размером от 2,5 до 5,0 мм равно от 417 до 590 об/мин;
- диск радиусом  $R_5 = 0,3 \text{ м}$ . Предельное значение частоты вращения распределительного диска для частиц гранулированного шлака размером от 2,5 до 5,0 мм равно от 382 до 541 об/мин.

## ВЫВОДЫ

1. Исходя из оптимальных значений величин скорости равномерного движения установлены размеры частиц распределяемого противогололедного материала, находящиеся в пределах от 2,6 до 5,1 мм.

2. Важным критерием для обеспечения процесса распределения ПГМ является величина скорости равномерного движения, которая дает возможность работать технологическим машинам, распределяя материал по поверхности дороги в так называемом контролируемом режиме, т. е. точно по ширине проезжей части, а не за ее пределы.

3. При определении величины максимальной скорости частицы в момент отрыва ее от поверхности распределительного диска, учитывая при этом предельные величины скорости равномерного движения частиц, обозначились частоты вращения распределительных дисков, применение которых не способствует минимизации антропогенного загрязнения окружающей среды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Design of anti-icing surfaces: smooth, textured or slippery / M. J. Kreder, J. Alvarenga, P. Kim, J. Aizenberg. – DOI: 10.1038/natrevmats.2015.3. – Текст : непосредственный // Nature Reviews Materials. – 2016. – №1 (1). – Р. (1–36).
2. Борисюк, Н. В. Зимнее содержание городских дорог : учебное пособие / Н. В. Борисюк. – Москва : Инфра-Инженерия, 2019. – 148 с. – ISBN 978-5-9729-0265-1. – Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/86587.html> (дата обращения: 28.09.2022). – Режим доступа: для авторизир. пользователей.
3. Оборудование для переработки сыпучих материалов / В. Я. Борщев, Ю. И. Гусев, М. А. Промтов, А. С. Тимонин. – Москва : «ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ-1», 2006. – 208 с. – Текст : непосредственный.
4. Геращенко, В. Н. Машины дорожного и коммунального хозяйства : учебно-методическое пособие / В. Н. Геращенко. – Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2021. – 66 с. – ISBN 978-5-4497-1123-6. – Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/108301.html> (дата обращения: 27.09.2022). – Режим доступа: для авторизир. пользователей. – DOI: <https://doi.org/10.23682/108301/>.
5. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов по безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация = Occupational safety standards system. Dangerous and harmful working factors. Classification : издание официальное : межгосударственный стандарт : утвержден Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 9 июня 2016 г. N 602-ст межгосударственный стандарт ГОСТ 12.0.003-2015 введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 марта 2017 г. : взамен ГОСТ 12.0.003-74 : дата введения 2017-01-03 / разработан Обществом с ограниченной ответственностью «ЭкоНиллервис», ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». – Москва : Стандартинформ, 2016. – 16 с. – Текст : непосредственный.
6. ГОСТ 3476-2019. Шлаки доменные гранулированные для производства цементов : издание официальное : утвержден Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31 октября 2019 г. № 854-ст межгосударственный стандарт ГОСТ 3476-2019 введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 июня 2020 г. : взамен ГОСТ 3476-74 : дата введения 2020-06-01 / разработан НО «СОЮЗЦЕМЕНТ» и ООО Фирма «ЦЕМИСКОН». – Москва : Стандартинформ, 2019. – 7 с. – Текст : непосредственный.
7. Государственный стандарт Российской Федерации. Сита лабораторные из металлической проволочной сетки. Технические условия = Test sieves of metal wire cloth. Specifications : утвержден Постановлением Госстандарта России от 22 декабря 1999 г. № 567-ст : введен впервые : дата введения 2000-03-01 / разработан Государственным научным учреждением «Всероссийский научно-исследовательский институт зерна и продуктов его переработки». – Москва : Госстандарт России, 2000. – URL : <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294845/4294845370.htm> (дата обращения: 11.09.2022). – Текст : электронный.
8. Гусев, Л. М. Борьба со скользкостью городских дорог / Л. М. Гусев. – Москва : Стройиздат, 1964. – 87 с. – Текст : непосредственный.
9. Моделирование процесса классификации твердых сыпучих материалов / О. И. Дроздова, В. А. Гребенникова, Л. М. Мансур, А. А. Шагарова. – Текст : непосредственный // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2020. – № 4 (33). – С. 18–23.
10. Жулай, В. А. Машины и оборудование для грохочения, сепарации и классификации строительных материалов. Конструкции и расчёты : учебное пособие / В. А. Жулай, Л. Х. Шарипов. – Воронеж : Воронежский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2019. – 218 с. – ISBN 978-5-7731-0801-6. – Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/100445.html> (дата обращения: 10.11.2021). – Режим доступа: для авторизир. пользователей.
11. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: Закон Донецкой Народной Республики : принят Народным Советом ДНР 5 июня 2015 г. № 54-ІНС. – Донецк : Народный Совет ДНР, 2015. – 45 с. – Текст : непосредственный.
12. Кралин, А. К. Исследование параметров классификации смёта противогололёдного материала для повторного использования / А. К. Кралин, Д. А. Макеева. – Текст : непосредственный // Научно-практический журнал «Строитель Донбасса». – 2022. – № 1 (18) март. – С. 32–37. – [http://donnasa.ru/publish\\_house/journals/sd/2022/sd\\_2022-1\(18\).pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/sd/2022/sd_2022-1(18).pdf) (дата обращения: 11.09.2022).
13. Национальная программа модернизации и развития автомобильных дорог Российской Федерации до 2025 года : проект / разработчики ЗАО «НИПИ территориального развития и транспортной инфраструктуры», ИЭПП, РосдорНИИ [и др.] ; Министерство транспорта и связи Российской Федерации. Федеральное дорожное агентство. – Москва : [б. и.], 2004. – 111 с. – Текст : непосредственный.
14. ОДМ 218.011-98. Методические рекомендации по озеленению автомобильных дорог : издание официальное : утверждено Приказом ФДС России № 421 от 05.11.98 г. / разработчики А. Я. Эрастов, Ю. Н. Розов, Е. В. Малиновская [и др.]. – Москва : Федеральная дорожная служба Росснит, 1998. – 52 с. – Текст : непосредственный.

15. ОДН 218.2.027-2003. Отраслевые дорожные нормы. Требования к противогололедным материалам : издание официальное : приняты и введены в действие распоряжением Минтранса России от 16.06.03 № ОС-548-р : введены впервые : дата введения 2003-06-03 / разработаны В. А. Кретов, Ю. Н. Розов, Н. С. Полосина-Никитина [и др.]. – Москва : Министерство Транспорта Российской Федерации, Государственная служба дорожного хозяйства, 2003. – 23 с. – Текст : непосредственный.
16. ОДН 218.5.016-2002. Показатели и нормы экологической безопасности автомобильной дороги : издание официальное : утверждено распоряжением Минтранса России № ИС-1147-р от 25.12.2002 г. : введены впервые : дата введения 2003-01-01 / разработчики МАДИ, СоюздорНИИ, Брянская государственная инженерно-технологическая академия. – Москва : Министерство транспорта Российской Федерации, Государственная служба дорожного хозяйства, 2003. – 44 с. – Текст : непосредственный.
17. Рекомендации по обеспечению экологической безопасности в придорожной полосе при зимнем содержании автомобильных дорог : издание официальное : приняты и введены в действие распоряжением Министерства транспорта Российской Федерации № ИС-1007-р от 17.11.2003 г. : введены впервые : дата введения 2003-01-01 / разработчики федеральное государственное унитарное предприятие Саратовский научно-производственный центр «Росдортех». – Москва : РОСАВТОДОР, 2003. – 44 с. – Текст : непосредственный.
18. Аналитическая оценка оборудования для дробления и сепарации по крупности техногенного сырья / Д. О. Скобелев, В. А. Марьев, Л. Я. Шубов [и др.]. – Текст : электронный // Экология промышленного производства. – 2018. – № 1 (101). – С. 2–10. – URL: [https://elibrary.ru/author\\_items.asp?authorid=864409&pubrole=100&show\\_refs=1&show\\_option=0](https://elibrary.ru/author_items.asp?authorid=864409&pubrole=100&show_refs=1&show_option=0) (дата обращения: 11.09.2022).
19. СНиП 2.05.02-85. Автомобильные дороги : издание официальное : взамен СНиП Н-Д.5-72 и СН 449-72 в части норм проектирования земляного полотна автомобильных дорог : дата введения 1987-01-01 / разработаны Союздорнии Минтрансстроя, Союздорпроект Минтрансстроя, Московский автомобильно-дорожный институт Минвуза СССР [и др.]. – Москва : Госстрой СССР, 2001. – 52 с. – Текст : непосредственный.
20. СНиП 3.06.03-85. Автомобильные дороги : издание официальное : утверждены постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 20 августа 1985 года № 133 : взамен СНиП III-40-78 : дата введения 1986-01-01. – Москва : ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 112 с. – Текст : непосредственный.
21. Технологическое обоснование диаметра ячейки барабанного грохота при повторной промывке песков в условиях месторождения «Кондер» / В. А. Старцев, Ю. А. Старцев, Ю. В. Стенин, И. С. Бойков // Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений : сборник докладов IX Международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 06–07 апреля 2020 года. – Екатеринбург : Уральский государственный горный университет, 2020. – С. 106–113. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42985230> (дата обращения: 13.09.2022). – EDN: SPPGUQ.
22. Цупиков, С. Г. Машины для строительства, ремонта и содержания автомобильных дорог : учебное пособие / С. Г. Цупиков, Н. С. Казачек. – Москва : Инфра-Инженерия, 2018. – 184 с. – ISBN 978-5-9729-0226-2. – Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/78270.html> (дата обращения: 28.09.2022). – Режим доступа: для авторизир. пользователей.
23. Визуализация данных дистанционного зондирования дорожных сетей в целях анализа экологического и социо-экологического воздействия / В. В. Челноков, В. П. Мешалкин, С. П. Стрелков, К. Г. Кондрашин. – Текст : электронный // Геодезия и картография. – 2021. – Том 82, № 3. – С. 36–43. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45639035> (дата обращения: 28.09.2022).
24. Шведский путь отходов. Как устроена одна из самых эффективных систем обращения с мусором в мире. – Текст : электронный // ovayagazeta.ru : [сайт]. – 2020. – URL: <https://novayagazeta.ru/articles/2020/09/07/86985-shvedskiy-put-otodov> (дата обращения: 28.09.2022).
25. Шестопалов, А. А. Строительные и дорожные машины. Машины для переработки каменных материалов / А. А. Шестопалов, В. В. Бадалов. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2014. – 116 с. – ISBN 978-5-7422-4276-5. – Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/43974.html> (дата обращения: 28.09.2021). – Режим доступа: для авторизир. пользователей.
26. Подольский, Вл. П. Экологические аспекты зимнего содержания дорог / Вл. П. Подольский, Т. В. Самодурова, Ю. В. Федорова. – Воронеж : Воронежская государственная архитектурно-строительная академия, 2000. – 152 с. – Текст : непосредственный.
27. Экология зимнего содержания автомобильных дорог. Обзорная информация. Выпуск 9 / Государственная служба дорожного хозяйства Министерство транспорта Российской Федерации. – Москва : Информавтодор, 2005. – 69 с. – Текст : непосредственный.

Получена 05.10.2022  
Принята 28.10.2022

А. К. КРАЛІН, Д. О. МАКЕЄВА, Д. Г. АСЕЄВ  
МІНІМІЗАЦІЯ АНТРОПОГЕННОГО ВПЛИВУ НА НАВКОЛИШНЄ  
СЕРЕДОВИЩЕ ПРИ МЕХАНІЗОВАНОМУ РОЗПОДІЛІ  
ПРОТИОЖЕЛЕДНИХ МАТЕРІАЛІВ  
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** Дано робота присвячена дослідженням, пов'язаним з раціоналізацією розподілу протиожеледного матеріалу по поверхні проїжджої частини доріг. Розглядаються питання, що відносяться до області зимового утримання автомобільних доріг загального користування та екологічної безпеки. Визначено необхідні розміри частинок одного з найпоширенішого протиожеледного матеріалу, використовуваного в технологічному процесі механізованого розподілу по поверхні проїжджої частини в нашому регіоні, гранульованого шлаку. Встановлено зв'язки між основними параметрами технологічного процесу механізованого розподілу протиожеледного матеріалу і компонентів протиожеледних сумішей. Встановлено залежність величини швидкості рівномірного руху від розміру зерен гранульованого шлаку. Визначено значення максимальної швидкості частинки в момент відриву від розподільного диска залежно від частоти обертання розподільного диска і його розмірів.

**Ключові слова:** екологічна безпека, міське господарство, протиожеледні фрикційні матеріали, сипучий матеріал.

ANDREY KRALIN, DARIA MAKEJEVA, DMITRY ASEEV  
MINIMIZATION OF ANTHROPOGENIC IMPACT ON THE ENVIRONMENT  
WITH MECHANIZED DISTRIBUTION OF ANTI-ICE MATERIALS  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** This work is devoted to research related to the rationalization of the distribution of deicing material on the surface of the carriageway. The issues related to the field of winter maintenance of public roads and environmental safety are considered. The necessary particle sizes of one of the most common deicing material used in the technological process of mechanized distribution over the surface of the roadway in our region, granular slag, have been determined. Connections between the main parameters of the technological process of mechanized distribution of deicing material and components of deicing mixtures are established. The dependence of the speed of uniform motion on the grain size of granulated slag is established. The value of the maximum particle velocity at the moment of separation from the distribution disk is determined, depending on the rotational speed of the distribution disk and its dimensions.

**Key words:** environmental safety, municipal economy, anti-icing friction materials, bulk material.

**Кралин Андрей Константинович** – кандидат технических наук, доцент кафедры наземных, транспортно-технологических комплексов и средств ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: основы модернизации, проектирование, расчет и техническая диагностика строительных и дорожных машин, экологическая безопасность.

**Макеева Даф'я Александровна** – кандидат технических наук, доцент кафедры техносферной безопасности ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: экологическая безопасность, рациональное природопользование, альтернативные источники энергии.

**Асеев Дмитрий Геннадьевич** – магистрант кафедры наземных, транспортно-технологических комплексов и средств ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: проектирование, и расчет строительных и дорожных машин.

**Кралин Андрій Костянтинович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри наземних, транспортно-технологічних комплексів і засобів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: основи модернізації, проектування, розрахунок і технічна діагностика будівельних і дорожніх машин, екологічна безпека.

**Макеєва Даф'я Олександровна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри техносферної безпеки ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: екологічна безпека, рациональне природоприкористування, альтернативні джерела енергії.

**Асеев Дмитро Геннадійович** – магістрант кафедри наземних, транспортно-технологічних комплексів і засобів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: проектування, і розрахунок будівельних і дорожніх машин.

**Kralin Andrey** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Ground Transport and Technological Complexes and Means Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: fundamentals of modernization, design, calculation and technical diagnostics of construction and road vehicles, environmental safety.

**Makejeva Daria** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Technosphere Safety Department? Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: environmental safety, rational use of natural resources, alternative energy sources.

**Aseev Dmitry** – master's student, Ground Transport and Technological Complexes and Means Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: design, and calculation of construction and road vehicles.

EDN: NWPAPI  
УДК 536.1:662.767.2

**Н. В. КОЛОСОВА**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РЕАКТОРА ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПОДОГРЕВА БИОМАССЫ В БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКЕ**

**Аннотация.** Процесс производства биогаза из отходов животноводческих ферм зависит от различных технологических факторов, основным из которых является температура сбраживания. Для производства биогаза на практике применяют мезофильный режим сбраживания. Технологический процесс работы метантенка предусматривает замену части сброшенной массы свежей биомассой нескользко раз в сутки. Температура свежей биомассы в холодный период года значительно ниже температуры сбраживания. Это приводит к снижению температуры в метантенке. Метаногенные бактерии при мезофильном режиме сбраживания чувствительны к изменению температуры. Колебания температуры сбраживания на нескользко градусов может привести к снижению объема получаемого биогаза. Для избежание колебаний температуры сбраживания в метантенке после загрузки свежей порции биомассы предлагается добавление в схему биогазовой установки реактора для предварительного подогрева биомассы.

**Ключевые слова:** метантенк, биогаз, температура сбраживания, дополнительный подогрев.

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Анаэробное сбраживание представляет процесс разложения органических веществ до образования метана и диоксида углерода, а также обеззараживания биомассы. Скорость протекания процесса зависит от различных факторов, влияющих на жизнедеятельность бактерий (температура, pH среды, продолжительность сбраживания, влажности, состав исходного сырья и др.). Интенсивность образования биогаза зависит от оптимального сочетания основных влияющих факторов.

### **АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ**

Для получения биогаза путем анаэробного сбраживания отходов животноводческих ферм используются метантенки (МТ). Анализ литературных источников [1–5] показал, что основные факторы влияющие на процесс анаэробного сбраживания должны находиться в определенных пределах.

При непрерывном режиме работы МТ необходимо учитывать, что глубина сбраживания органической части сбраживаемой массы зависит от длительности ее пребывания в реакторе. В работе [6] приводится зависимость выхода биогаза от длительности сбраживания. Установлено, что оптимальная длительность сбраживания составляет 10–12 суток.

Влажность субстрата играет важную роль в процессе сбраживания. Для возможности равномерного перемешивания и стабильного разложения массы влажность биомассы должна находиться в пределах 85...95 %.

Стабильность разложения органических веществ зависит от значения pH среды и его постоянства. Кислотность сбраживаемой массы колеблется в пределах от 6,0 до 8,0 [2–4, 7].

Одним из основных факторов влияющих на интенсивность образования биогаза, является температура сбраживания и ее колебание. Производство биогаза может осуществляться в широком температурном диапазоне. В зависимости от температурного режима, который поддерживается в МТ в процессе работы, различают три режима сбраживания: психрофильный (10...20 °C), мезофильный (30...45 °C), термофильный (50...65 °C) [4–5].



Большинство установок работают в мезофильном режиме с температурой сбраживания 35...40 °С. При этом режиме наиболее активно развиваются метаногенные бактерии с максимальным образованием биогаза.

В работе [8] приведены графики, построенные на опытных значениях выделения биогаза в зависимости от температуры сбраживания, для различных групп животных. Данные получены при длительности сбраживания от 10–21 суток. Для удобства практических расчётов на основании приведенных опытных данных были построены регрессионные уравнения для различных групп животных.

Зависимости объема получаемого биогаза от температуры для навоза крупного рогатого скота и свиней

$$V_{KPC} = -1,22 + 0,195 \cdot t - 0,0114 \cdot t^2 + 3,09 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - 3,00 \cdot 10^{-6} \cdot t^4, \quad (1)$$

$$V_{\text{свиньи}} = -14,07 + 1,723 \cdot t - 7,61 \cdot 10^{-2} \cdot t^2 + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot t^3 - 1,06 \cdot 10^{-5} \cdot t^4, \quad (2)$$

где  $V_{KPC}$  – суточный объем выделенного биогаза, получаемый при сбраживании 1 кг сухого органического вещества из навоза крупного рогатого скота, м<sup>3</sup>/сутки;

$V_{\text{свиньи}}$  – суточный объем выделенного биогаза, получаемый при сбраживании 1 кг сухого органического вещества из навоза свиней, м<sup>3</sup>/сутки;

$t$  – температура сбраживания, °С.

Можно сделать вывод, что оптимальной температурой сбраживания является 35...42 °С. При больших температурах наблюдается угнетение жизнедеятельности метаногенных бактерий. При снижении температуры также замедляется жизнедеятельность метаногенных бактерий и снижается образование биогаза. При термофильном режиме сбраживания будет наблюдаться иная зависимость выхода биогаза от температуры, так как бактерии будут адаптироваться к другому температурному режиму сбраживания.

Учитывая, что метаногенные бактерии очень чувствительны к изменению температуры и резкие изменения температуры приводят к снижению образования биогаза, необходимо строго поддерживать температурный режим сбраживания в метантенке.

## ЦЕЛЬ

Целью настоящей работы является применение дополнительного реактора для нагрева свежей порции биомассы перед подачей в МТ.

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Стабильное образование биогаза предполагает непрерывный процесс сбраживания биомассы в МТ. МТ является основой биогазовой установки, в котором происходит сбраживание биомассы и образование биогаза. Отходы животноводческих ферм поступают в приемный резервуар для измельчения крупных включений. В нем происходит их предварительное накопление, перемешивание, осаждение и удаление тяжелых фракций. После загрузки рабочего объема МТ сбраживаемой массой и стабильным образованием биогаза (10–15 сутки), необходима частичная выгрузка сброшенной массы и загрузка такого же объема свежей биомассы. Объем выгружаемой сброшенной массы принимается 10...15 % от рабочего объема МТ. Подача свежей порции биомассы в метантенк происходит 1-2 раза в сутки с помощью специального насоса для жидких и вязких субстратов. Для поддержания стабильной температуры внутри метантенка оборудуется система обогрева (змеевик). Субстрат два раза в сутки перемешивается при помощи турбинной мешалки. Выгрузка сброшенного субстрата происходит автоматически с такой же периодичностью, как и загрузка.

Температура загружаемой биомассы ниже температуры сбраживания в метантенке. В зимнее время загружаемая биомасса имеет температуру менее 5 °С.

После загрузки свежей порции биомассы температура в метантенке значительно снижается, что приводит к замедлению и угнетению жизнедеятельности метаногенных бактерий. И как следствие снижение выхода биогаза.

Обычно на практике количество теплоты, нагревающее сбраживаемую массу в МТ, компенсирует только потери теплоты в окружающую среду. В момент загрузки свежей порции биомассы необходимо увеличить нагрев МТ до достижения температуры сбраживания. Но для увеличения мощности нагрева необходимо увеличить температуру греющей воды в змеевике. Это приведет к перегреву СМ возле поверхности змеевика.

Тепловой баланс в МТ можно записать в виде следующего уравнения

$$Q_{\text{нагр}} + Q_{\text{сбр}} = Q_{\text{св.бм}} + Q_{\text{ном}}, \quad (3)$$

где  $Q_{\text{нагр}}$  – количество подводимой к метантенку теплоты, кДж/сут;

$Q_{\text{сбр}}$  – количество теплоты, образующейся при анаэробном разложении биомассы, кДж/сут;

$Q_{\text{ном}}$  – потери теплоты в окружающую среду через стенки МТ, кДж/сут;

$Q_{\text{св.бм}}$  – требуемая теплота для нагрева свежей порции биомассы, кДж/сут.

В биохимических процессах анаэробного сбраживания биомассы наблюдается выделение тепла. Это происходит на этапе расщепления анаэробных бактерий и образования уксусной кислоты. Этот вопрос рассмотрен в работах [4, 9] и основываясь на том, что суммарное тепловыделение незначительно, величиной  $Q_{\text{сбр}}$  можно пренебречь.

Учитывая этот факт, выражение (3) принимает вид

$$Q_{\text{нагр}} = Q_{\text{св.бм}} + Q_{\text{ном}}. \quad (4)$$

Пользуясь формулами [10], можно определить мощность нагрева сбраживаемой массы в МТ после загрузки свежей биомассы и время нагрева всего объема до заданной температуры сбраживания.

По формулам [8, 10] был выполнен расчет температуры сбраживания в метантенке после загрузки свежей порции биомассы.

Расчет выполнялся для МТ объемом – 9,5 м<sup>3</sup>, температура сбраживания – 35 °С, длительность сбраживания – 15 суток, плановая влажность сбраживаемой массы – 90 %, температура вводимой свежей порции СМ – 5 °С, температура наружного воздуха – 22 °С. Загрузка свежей порции биомассы производится два раза в сутки. Длительность нагрева СМ принята 2 часа.

По результатам расчета построены графики мощности нагрева в течение суток (рисунок 1) для МТ объемом 9,5 м<sup>3</sup>.

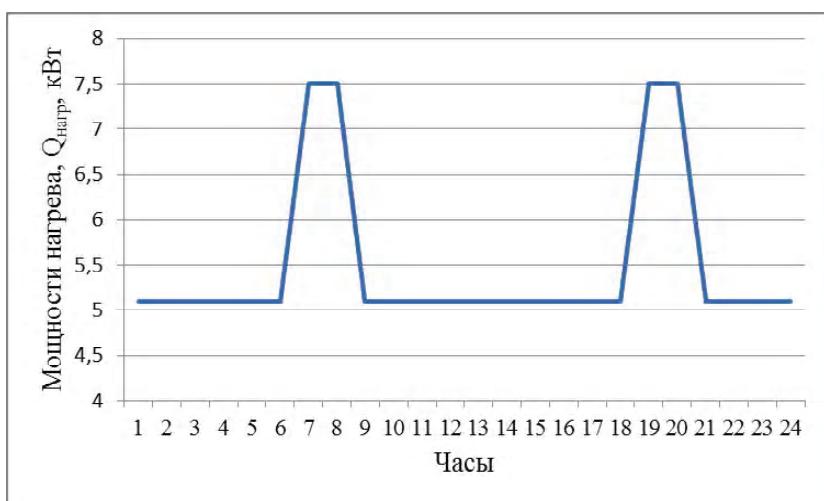


Рисунок 1 – Мощности нагрева МТ в течение суток.

На рисунке 2 приводится график снижения температуры в МТ после загрузки свежей порции биомассы и выхода биогаза в течение суток.

Оптимальным решением поддержания постоянной температуры в МТ после загрузки свежей порции биомассы является применение дополнительного реактора для нагрева свежей биомассы до температуры сбраживания (рисунок 3).

В приведенной схеме биогазовой установки свежая биомасса из приемного резервуара подается в реактор предварительного нагрева, в котором нагревается непосредственно перед загрузкой в МТ до температуры сбраживания. Нагретая свежая биомасса подается в МТ.

Данная схема позволяет избежать охлаждение сбраживаемой массы в МТ и угнетение жизнедеятельности метаногенных бактерий.

Тогда тепловой баланс МТ будет иметь вид

$$Q_{\text{нагр}} = Q_{\text{ном}}.$$

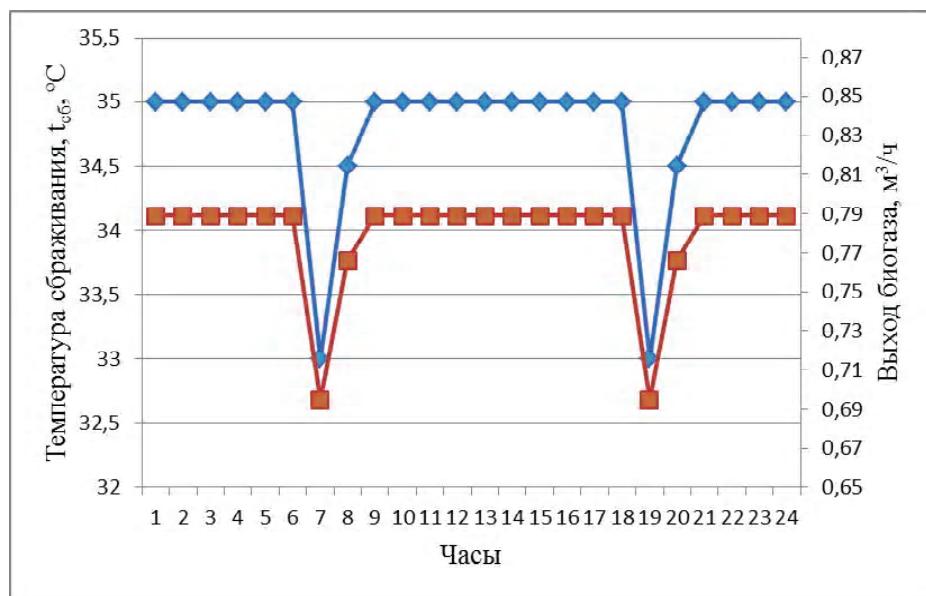


Рисунок 2 – Температуры сбраживания и выхода биогаза после загрузки свежей порции биомассы в течение суток.

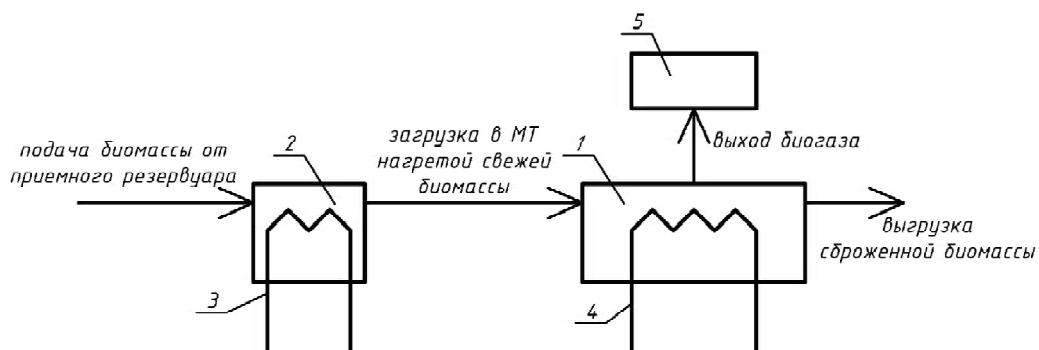


Рисунок 3 – Схема биогазовой установки с дополнительным реагентом для нагрева свежей биомассы до температуры сбраживания: 1 – МТ, 2 – реактор предварительного нагрева свежей биомассы, 3 – нагреватель предварительного нагрева, 4 – нагреватель МТ, 5 – газгольдер.

Для рассчитываемого МТ выход биогаза с применением реактора предварительного подогрева биомассы составит 18,94 м<sup>3</sup>/сутки. Выход биогаза для данного реактора без предварительного подогрева свежей биомассы составит 17,9 м<sup>3</sup>/сутки. Стабилизация температуры в метантенке, за счет предварительного подогрева свежей порции биомассы, приводит к увеличению выхода биогаза на 5 % в сутки.

## ВЫВОДЫ

Добавление в технологическую схему биогазовой установки реактора предварительного подогрева свежей порции биомассы не дает возможность уменьшить мощность нагрева сбраживаемой массы, приводит к стабилизации процесса сбраживания за счет отсутствия изменения температуры биомассы в МТ. При применении реактора предварительного нагрева биомассы необходимо на стадии проектирования выполнить расчет мощности нагрева МТ и реактора предварительного подогрева биомассы. Это позволит подобрать оптимальную конструкцию нагревательных элементов и задать температурный режим греющего теплоносителя.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

1. Комина, Г. П. Получение и использование биогаза в решении задач энергосбережения и экологической безопасности : учебное пособие / Г. П. Комина, А. В. Сауц. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2017. – 96 с. – ISBN 978-5-9227-0805-0. – Текст : электронный.
2. Achinas, S. A technological overview of biogas production from biowaste / S. Achinas, V. Achinas, G. j W. Euverink. – Текст : электронный // Engineering. – 2017. – № 3(3). – Р. 299–307. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/318477757\\_A\\_Technological\\_Overview\\_of\\_Biogas\\_Production\\_from\\_Biwaste](https://www.researchgate.net/publication/318477757_A_Technological_Overview_of_Biogas_Production_from_Biwaste) (дата публикации: 21.06.2017).
3. Караева, Ю. В. Обзор биогазовых технологий и методов интенсификации процессов анаэробного сбраживания / Ю. В. Караева, И. А. Трахунова. – Текст : электронный // Труды Академэнерго. – 2010. – № 3. – С. 109–127. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15181824> (дата публикации: 21.06.2017).
4. Дубровский, В. С. Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов / В. С. Дубровский, У. Э. Виестур. – Рига : Зиннатне, 1988. – 204 с. – ISBN 5-7966-0056-7. – Текст : непосредственный.
5. Олексюк, А. О. Енергосбереження при використанні нетрадиційних джерел : навчальний посібник для студентів економічних спеціальностей в галузі теплогазопостачання та вентиляції / А. О. Олексюк, В. А. Сербін, Н. Ф. Радько. – Донецьк : Держжитлокомунгоспу України, 2004. – 156 с. – Текст : непосредственный.
6. Колосова, Н. В. Анализ технологических особенностей сбраживания биомассы в метантенках для получения биогаза / Н. В. Колосова, О. В. Чеботарева, В. А. Сербин. – Текст : непосредственный // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2010. – Випуск 2010-6(86) Інженерні системи та техногенна безпека. – С. 131–134.
7. Семененко, И. В. Оборудование и процессы метанового сбраживания органических отходов : монография / И. В. Семененко, М. Г. Зинченко. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2012. – 272 с. – URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/27507> (дата обращения: 21.09.2022). – Текст : электронный.
8. Лазуткин, В. Э. Влияние температуры сбраживания на объем получаемого биогаза / В. Э. Лазуткин, Р. С. Студеникин, Н. В. Колосова. – Текст : электронный // Энергоресурсосбережение в инженерных и энергетических системах зданий и сооружений : электронный сборник статей по материалам III открытой международной очно-заочной научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Макеевка, 04 февраля 2022 года / Редколлегия: В. Ф. Мущанов, А. В. Лукьянов, В. И. Нездайминов [и др.]. – Макеевка : ГОУ ВПО «ДОННАСА», 2022 – С. 43–47. – URL: [http://donnasa.ru/docs/nik/nauchnye\\_konferencii/sbornik\\_po\\_konferencii\\_04.02.22.pdf](http://donnasa.ru/docs/nik/nauchnye_konferencii/sbornik_po_konferencii_04.02.22.pdf) (дата публикации: 21.09.2022).
9. Друзьянова, В. П. Энергосберегающая технология переработки навоза крупного рогатого скота : специальность 05.20.01 «Технологии и средства механизации сельского хозяйства» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Друзьянова Варвара Петровна ; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова». – Улан-Удэ, 2017. – 281 с. – Текст : непосредственный.
10. Колосова, Н. В. Процессы теплообмена в метантенке при сбраживании биомассы / Н. В. Колосова, О. В. Чеботарева, В. А. Сербин. – Текст : непосредственный // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2011. – Випуск 2011-5(91) Інженерні системи та техногенна безпека. – С. 31–37.

Получена 17.10.2022

Принята 28.10.2022

Н. В. КОЛОСОВА  
ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ РЕАКТОРА ДЛЯ ПОПЕРЕДНЬОГО  
ПІДГРІВУ БІОМАСИ В БІОГАЗОВІЙ УСТАНОВЦІ  
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** Процес виробництва біогазу з відходів тваринницьких ферм залежить від різних технологічних факторів, основним з яких є температура зброджування. Для виробництва біогазу на практиці застосовують мезофільній режим зброджування. Технологічний процес роботи метантенка передбачає заміну частини збродженої маси свіжою біомасою декілька раз на добу. Температура свіжої біомаси в холодний період року значно нижче температури зброджування. Це призводить до зниження температури в метантенку. Метаногенні бактерії при мезофільному режимі зброджування чутливі до зміни температури. Коливання температури зброджування на кілька градусів може привести до зниження об'єму одержуваного біогазу. Для уникнення коливань температури зброджування в метантенці після завантаження свіжої порції біомаси пропонується ввести в схему біогазової установки реактора для попереднього підгріву біомаси.

**Ключові слова:** метантенк, біогаз, температура зброджування, додатковий підгрів.

NELLI KOLOSOVA

EFFICIENCY OF USING A REACTOR FOR PREHEATING BIOMASS IN A  
BIOGAS PLANT

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** The process of biogas production from livestock farm waste depends on various technological factors, the main of which is the fermentation temperature. Mesophilic fermentation mode is used in practice for biogas production. The technological process of the methane tank provides for the replacement of part of the fermented mass with fresh biomass several times a day. The temperature of fresh biomass in the cold season is significantly lower than the fermentation temperature. This leads to a decrease in the temperature in the methane tank. Methanogenic bacteria in mesophilic fermentation mode are sensitive to temperature changes. Fluctuations in the fermentation temperature by several degrees can lead to a decrease in the volume of biogas produced. In order to avoid fluctuations in the fermentation temperature in the methane tank after loading a fresh portion of biomass, it is proposed to add a reactor for preheating biomass to the scheme of the biogas plant.

**Key words:** digester, biogas, digestion temperature, additional heating

**Колосова Нелли Вадимовна** – кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергоресурсосбережение.

**Колосова Неллі Вадимівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергоресурс-созбереження.

**Kolosova Nelli** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: energy saving.

EDN: ОНДП

УДК 662.951.2

Ю. А. ГОЛОВАЧ, О. В. МИХАЙСКАЯ, Н. А. ВОЖОВА

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЖИГАНИЯ ГАЗОВОГО ТОПЛИВА В ГОРЕЛКАХ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТЛОГО ТИПА

**Аннотация.** В системах отопления производственных предприятий широко применяются газовые горелки инфракрасного излучения. Высокотемпературные излучатели с температурой поверхности от 600 до 1 200 °C обеспечивают обогрев помещений большого объёма и высоты, в которых другие системы отопления являются неэффективными. На основании литературного анализа выявлены преимущества использования инфракрасных горелок «светлого» типа. Ветроустойчивость горелок инфракрасного излучения на открытом воздухе может обеспечиваться установкой перед насадкой экрана, прозрачного для инфракрасного излучения. Исследованы пути увеличения КПД горелок инфракрасного излучения. На основании лабораторных исследований горелки ГИИ-1,85 «Звездочка» получена зависимость излучательной способности горелки от величины коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  и давления газа перед горелкой, оснащенной прозрачным экраном. Использование полученной зависимости позволит рассчитать изменение теоретического КПД горелок.

**Ключевые слова:** горелка инфракрасного излучения, «светлый» излучатель, коэффициент избытка воздуха, температура излучающей поверхности, прозрачный экран.

В последнее время все большую актуальность приобретает вопрос рационального использования природного газа для получения наибольшего экономического эффекта и повышения эффективности производственных процессов. Многолетняя практика показывает, что традиционные конвективные системы отопления не способны эффективно обогревать помещения периодического и кратковременного использования, помещения с частично используемой площадью, помещения значительной высоты, а также открытые и полуоткрытые площадки в силу присущих им недостатков.

Эффективное сжигание природного газа может обеспечиваться с использованием горелок инфракрасного излучения (ГИИ), которые работают по принципу лучистого теплообмена. Горелки инфракрасного излучения являются разновидностью инжекционных горелок, рассчитанных на работу с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha = 1,02 \dots 1,07$ .

Как показывают многочисленные исследования горелок инфракрасного излучения и практически осуществленных отопительных установок, в помещениях с использованием этих горелок при нормальных эксплуатационных режимах работы (давление газа, тепловая нагрузка, приток воздуха и отвод продуктов сгорания) обеспечивается довольно высокая полнота сжигания газа в этих горелках [1, 2]. Применение лучистых систем отопления обеспечивает снижение расхода тепловой энергии на 30...40 % по сравнению с системами конвективного отопления [3, 4].

Тепловое излучение от инфракрасных излучателей не поглощается воздухом, поэтому вся энергия без потерь достигает обогреваемых поверхностей. Биологическое действие инфракрасного радиационного отопления благоприятно для человека [5, 6].

Существующие горелки делятся на два основных типа: «тёмные», у которых температура накала не превышает 600 °C, и «светлые», у которых температура тела накала выше 600 °C. У «тёмных» излучателей процесс горения происходит в полностью закрытом пространстве, а у «светлых» – непосредственно на излучающей поверхности, т. е. открыто и небезопасно. Поэтому к применению «светлых» излучателей предъявляются более жесткие требования по пожарным нормам. «Светлые» излучатели в среднем на 10...15 % экономичнее по потреблению газа за счет исключения потерь тепла с уходящими газами, потребляют меньше электроэнергии и создают меньше шума. Кроме того,



эксплуатационные затраты на энергоноситель, электроэнергию и техническое обслуживание для «светлых» инфракрасных излучателей до пяти раз меньше, чем для «тёмных».

Применение лучистых систем отопления сдерживается тем, что нормативная база для расчёта и проектирования систем отсутствует или не соответствует современному техническому уровню. Решение задач создания оптимальных условий микроклимата в рабочей зоне промышленных помещений и экономии газового топлива при использовании газовых инфракрасных излучателей неразрывно связано с необходимостью изучения и анализа процесса сложного теплопереноса в областях с многослойными ограждающими конструкциями, габаритным оборудованием и условий теплоотвода по всем границам области нагрева [7–9].

Из-за низких значений КПД высокотемпературных излучателей, составляющих менее 50 %, делаются попытки повышения их эффективности [10]. В связи с этим возникает необходимость в проведении экспериментальных исследований для определения оптимальных условий сжигания газа, что и обозначило **цель** исследования.

В условиях эксплуатации ГИИ на открытом воздухе требуется высокая их ветроустойчивость. Это может быть достигнуто установкой перед насадкой экрана, прозрачного для инфракрасного излучения. Однако экран, выполненный из кварцевого стекла, вследствие отражения части инфракрасного излучения, будет способствовать разогреву керамических плиток, и температура газовоздушной смеси может повыситься настолько, что станет возможным проскок пламени. Стабильность горения по отношению к проскоку можно повысить увеличением коэффициента избытка воздуха смеси  $\alpha$ , однако при этом снижается интенсивность инфракрасного излучения. Экспериментальные исследования работы ГИИ при установке экрана, изолирующего продукты сгорания от окружающего воздуха, представляют интерес, так как именно открытое поверхностное горение ограничивает сферу их применения [10, 11].

Наиболее полно тепловой баланс ГИИ с перфорированной керамической насадкой рассмотрен А. К. Родиным. Автор отмечает, что получить расчетным путем все необходимые для проектирования систем и установок радиационного обогрева параметры и характеристики газовых ГИИ практически нельзя. Некоторые из них определяют экспериментальным путем.

Увеличение КПД ГИИ возможно посредством установки металлической сетки над керамическим излучателем, обрёбения поверхности керамики, увеличения доли излучения стенками каналов, а также увеличения теплоотвода в стенки каналов [10].

Металлическая сетка способствует повышению ветроустойчивости и эффективности, так как становится вторичным дополнительным излучателем. Доля излучаемой энергии возрастает на 4...14 % в зависимости от удельной тепловой нагрузки. Сетка возвращает часть эмитированных энергетических частиц назад на активную поверхность, что приводит к возбуждению частиц атомов и к последующему увеличению эмиссии фотонов излучения.

При сжигании газовоздушной смеси наблюдается неравномерность нагревания поверхности плоских керамических плиток. Появление зон с различной температурой нагрева объясняется различием в толщине перемычек между отверстиями и различием диаметров отверстий. Обрёбение поверхности в виде пирамид, конусов или борозд увеличивает площадь радирующей поверхности, исключает или значительно уменьшает неравномерность нагрева керамики, повышает полноту сгорания и долю теплоты, передаваемой в виде излучения, по сравнению с плоским излучателем.

Исследованиями установлено, что у газовых ГИИ с керамическими насадками даже при расположении над ними металлических сеток интенсивность излучения в различных направлениях по полусфере от нормали к насадке неодинакова. По нормали к поверхности ( $\phi = 90^\circ$ ) на близких расстояниях от излучающей насадки плотность излучения меньше, чем под углом 75 и 45°. При приближении к краям горелки плотность излучения снова снижается.

Суммарное излучение горелки в значительной мере зависит от доли тепла, излучаемого стенками каналов. Таким образом, для увеличения лучистого КПД необходим интенсивный нагрев пламенем не только поверхности керамических плиток, но и внутренней поверхности устья каналов.

Передача части теплоты из зоны реакции в стенку при наличии теплоотвода вызывает уменьшение температуры пламени от теоретической температуры до некоторой температуры горения. Чем ниже температура горения, тем ниже температура продуктов сгорания на выходе из зоны горения. Доля прямой отдачи тепла излучением тем выше, чем ниже температура газов, уходящих из зоны горения. Увеличение теплоотвода в стенки каналов лимитируется гашением пламени в узких каналах. Процесс гашения пламени определяется диаметром каналов, а также длиной и числом соседних каналов, теплопроводностью материала стенки и теплофизическими свойствами газовоздушной

смеси. Температура стенки канала влияет на пределы устойчивости по отношению к проскоку пламени, а при прохождении пламени через перфорированные насадки существенную роль играет распределение температуры по длине огневого канала, которое зависит от теплопроводности материала насадки [10].

На основании лабораторных исследований горелки ГИИ-1,85 «Звездочка», которая относится к наиболее простым и распространенным горелкам инфракрасного излучения «светлого» типа, была получена зависимость излучательной способности горелки от величины коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  и давления газа перед горелкой  $P$ . Излучатель данной горелки был закрыт прозрачным экраном из термостойкого стекла с отверстием в центре для отвода продуктов сгорания. Согласно [10] прозрачный экран препятствует интенсивным конвективным теплопотерям, возникающим при обтекании окружающим воздухом излучающей поверхности горелок.

Опыты проводились при изменении величины коэффициента  $\alpha$  в пределах от 1,0 до 2,0 при фиксированном значении давления газа, которое изменялось ступенчато от 1 800 до 3 600 Па [10].

Исходные данные для расчета представлены в таблице.

**Таблица** – Температура излучающей поверхности при давлении газа перед горелкой  $P$  и коэффициенте избытка воздуха  $\alpha$

Давление газа перед горелкой $P$ , Па	Коэффициент избытка воздуха $\alpha$	Температура излучающей поверхности $t$ , °C	Давление газа перед горелкой $P$ , Па	Коэффициент избытка воздуха $\alpha$	Температура излучающей поверхности $t$ , °C
1 800	1,0	708	3 000	1,0	811
	1,2	844		1,2	895
	1,4	845		1,4	913
	1,6	841		1,6	881
	1,8	840		1,8	870
	2,0	838		2,0	868
2 400	1,0	760	3 600	1,0	827
	1,2	870		1,2	915
	1,4	879		1,4	927
	1,6	858		1,6	899
	1,8	851		1,8	886
	2,0	849		2,0	885

Зависимость излучательной способности горелок от коэффициента избытка воздуха и давления газа перед горелкой можно описать уравнением

$$t = -1,9999 \cdot 10^3 + 5,6858 \cdot 10^3 \cdot \alpha - 0,17333 \cdot P - 3,5883 \cdot 10^3 \cdot \alpha^2 + 8,7962 \cdot 10^{-5} \cdot P^2 + 7,3756 \cdot 10^2 \cdot \alpha^3 - 1,1574 \cdot 10^{-8} \cdot P^3. \quad (1)$$

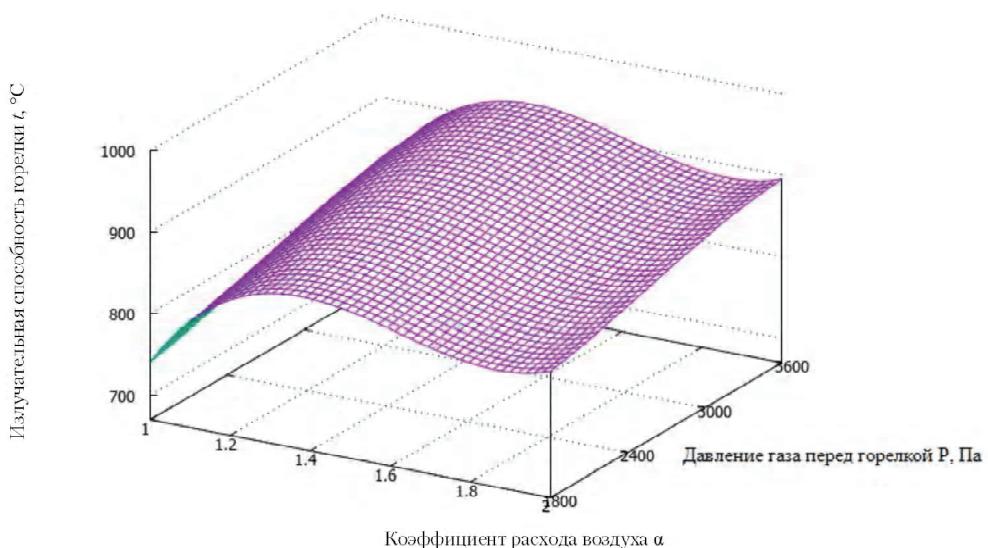
Проверка адекватности уравнения регрессии производилась по значению критерия Фишера, определяемого как отношение общей дисперсии к остаточной, при 10%-ном уровне значимости.

График зависимости излучательной способности горелки от коэффициента избытка воздуха и давления газа перед горелкой приведен на рисунке.

Из графика видно, что с увеличением коэффициента  $\alpha$  температура излучающей поверхности растет и достигает максимума 927 °C при  $\alpha = 1,4$ . Затем она снижается при всех исследованных величинах давления газа. С увеличением давления газа, следовательно, расхода газа и мощности горелки, температура излучающей поверхности растет от 708 °C при  $P = 1\ 800$  Па до 927 °C при  $P = 3\ 600$  Па. Использование данных эксперимента и полученной зависимости позволит рассчитать изменение теоретического КПД ГИИ.

## ВЫВОДЫ

Анализ литературных источников показывает перспективность применения горелок инфракрасного излучения светлого типа в системах отопления. Рассмотрены возможности увеличения КПД ГИИ. На основании зависимости излучательной способности горелки, оснащенной прозрачным экраном, от коэффициента избытка воздуха и давления газа перед горелкой можно определять излучательную способность горелки при значениях коэффициента избытка воздуха и



**Рисунок** – График зависимости излучательной способности горелки от коэффициента избытка воздуха и давления газа перед горелкой.

давления газа перед горелкой, для которых нет данных по результатам эксперимента. Дальнейшие исследования будут направлены на оценку энергоэффективности и экологических показателей ГИИ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Богомолов, А. И. Газовые горелки инфракрасного излучения и их применение / А. И. Богомолов, Д. Я. Вигдорчик, М. А. Маевский. – Москва : Стройиздат, 1967. – 254 с. – Текст : непосредственный.
- Родин, А. К. Применение излучающих горелок для отопления / А. К. Родин. – Ленинград : Недра. Ленинградское отделение, 1976. – 117 с. – Текст : непосредственный.
- Tian, Z. Energy performance optimization of radiantslabcool in guessing building simulation and field measurements / Z. Tian, J. A. Love. – Текст : электронный // Energy and Buildings. – 2009. – Volume 41, Issue 3. – P. 320–330. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.10.002> (дата обращения: 07.10.2022).
- Zhao, K. On-site measured performance of a radiant floor cooling/heating system in Xi'an Xianyang International Airport / K. Zhao, X-H. Liu, Y. Jiang. – Текст : электронный // Solar Energy. – 2014. – Volume 108. – P. 274–286. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.07.012> (дата обращения: 07.10.2022).
- Северинец, Г. Н. Применение газовых горелок инфракрасного излучения для сушки и нагрева / Г. Н. Северинец. – Ленинград : Недра. Ленинградское отделение, 1970. – 128 с. – Текст : непосредственный.
- Борхерт, Р. Техника инфракрасного нагрева / Р. Борхерт, В. Юбци ; [перевод с немецкого под редакцией И. Б. Левитина]. – Москва : Госэнергоиздат, 1963. – 278 с. – Текст : непосредственный.
- Influence of radiation on predictive accuracy in numerical simulations of the thermal environment in industrial buildings with buoyancy-driven natural ventilation / X. Meng, Y. Wang, T. Liu [et al.]. – Текст : электронный // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Volume 96, issue 3. – P. 473-480. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.105> (дата обращения: 07.10.2022).
- Rohdin, P. Numerical modelling of industrial indoor environments: A comparison between different turbulence models and supply systems supported by field measurements / P. Rohdin, B. Moshfegh. – Текст : электронный // Building and Environment. – 2011. – Volume 46, Issue 11. – P. 2365–2374. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.019> (дата обращения: 08.10.2022).
- Chow, K. On the influence of boundary conditions and thermal radiation on predictive accuracy in numerical simulations of indoor ventilation / K. Chow, A. E. Holdo. – Текст : электронный // Building and Environment. – 2010. – Volume 45, Issue 2. P. 437–444. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.021> (дата обращения: 08.10.2022).
- Пелипенко, В. Н. Газовые горелки инфракрасного излучения : учебное пособие / В. Н. Пелипенко, Д. Ю. Слесарев. – Тольятти: Издательство ТГУ, 2012. – 118 с. – Текст : непосредственный.
- ГОСТ 25696-83\*. Горелки газовые инфракрасного излучения. Общие технические требования и правила приемки = Infrared gas burners. General technical requirements and acceptance rules : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением государственного комитета СССР по стандартам от 29 марта 1983 г. № 11482-ст : Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 августа 2017 г. № 914-ст : введен впервые : дата введения 1984-07-01 / разработан

Минжилкомхозом РСФСР и Мингазпромом СССР. – Москва : Издательство стандартов, 1984. – 4 с. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/21112/> (дата обращения: 08.10.2022). – Текст : электронный.

Получена 18.10.2022

Принята 28.10.2022

Ю. О. ГОЛОВАЧ, О. В. МИХАЙСЬКА, Н. А. ВОЖОВА  
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПАЛЮВАННЯ ГАЗОВОГО ПАЛИВА В  
ПАЛЬНИКАХ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ СВІТЛОГО ТИПУ  
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** У системах опалення виробничих підприємств широко використовуються газові пальники інфрачервоного випромінювання. Високотемпературні випромінювачі з температурою поверхні від 600 до 1 200 °C забезпечують обігрів приміщень великого об'єму і висоти, в яких інші системи опалення є неефективними. Відростійкість пальників інфрачервоного випромінювання на відкритому повітрі може забезпечуватися установкою перед насадкою екрана, прозорого для інфрачервоного випромінювання. Досліджено шляхи збільшення ККД горілок інфрачервоного випромінювання. На підставі лабораторних досліджень пальника ПІВ-1,85 «Зірочка» отримана залежність випромінювальної здатності пальника від величини коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$  і тиску газу перед пальником. Використання отриманої залежності дозволить розрахувати зміну теоретичного ККД пальників.

**Ключові слова:** пальник інфрачервоного випромінювання, «світлий» випромінювач, коефіцієнт надлишку повітря, температура поверхні, що випромінює, прозорий екран.

YULIA GOLOVACH, OKSANA MIKHAYSKAYA, NATALIA VOZHOVA  
INCREASING OF THE EFFICIENCY OF GAS FUEL COMBUSTION IN LIGHT  
TYPE INFRARED BURNERS

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** At heating systems of industrial enterprises, gas burners of infrared radiation are widely used. High-temperature radiators with a surface temperature of 600 to 1 200 °C provide heating of large volumes and heights, in which other heating systems are ineffective. Wind resistance of infrared burners in the open air can be ensured by installing a screen transparent to infrared radiation in front of the nozzle. The ways of increasing the efficiency of infrared burners have been studied. Based on laboratory studies of the burner GII-1.85 «Star», the dependence of the emissivity of the burner on the value of the excess air coefficient  $\alpha$  and gas pressure in front of the burner equipped with a transparent screen was obtained. Using the obtained dependence will allow you to calculate the change in the theoretical efficiency of the burners.

**Key words:** infrared burner, «bright» emitter, excess air coefficient, emitting surface temperature, transparent screen.

**Головач Юлия Александровна** – кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: надежность распределительных сетей газоснабжения, рациональное использование газообразного топлива.

**Михайская Оксана Валентиновна** – ассистент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергоресурсосбережение в системах теплоснабжения и газоснабжения.

**Вожова Наталья Анатольевна** – магистрант ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: надежность распределительных сетей газоснабжения, оперативное управление системами газоснабжения.

**Головач Юлія Олександрівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: надійність розподільних мереж газопостачання, раціональне використання газоподібного палива.

**Михайська Оксана Валентинівна** – асистент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергоресурсозбереження в системах теплопостачання та газопостачання.

**Вожова Наталія Анатоліївна** – магістрант ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: надійність розподільних мереж газопостачання, оперативне керування системами газопостачання.

**Golovach Yulia** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: reliability of gas distribution networks, rational use of gaseous fuel.

**Mikhayskaya Oksana** – assistant, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: energy and resource saving at heat supply and gas supply systems.

**Vozhova Natalya** – Master's student, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: reliability of gas distribution networks, operating control of gas supply systems.

EDN: OODFCF

УДК 628.3

**В. И. НЕЗДОЙМИНОВ, В. С. РОЖКОВ, Ю. В. ВАСИЛЬЕВА**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СХЕМ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭРЛИФТНЫХ БИОРЕАКТОРОВ**

**Аннотация.** В статье приведено описание теоретических моделей схем улучшенного биологического удаления фосфора, созданных на базе Йоханнесбургского и Кейптаунского процессов, модифицированных использованием аэротенков-осветлителей с затопленной эрлифтной системой аэрации (эрлифтных биореакторов). Предложено применение моделирования биохимических процессов с помощью ASM3+Bio-P, которое позволяет описывать взаимное преобразование компонентов системы активного ила и прогнозировать качество очистки в таких сооружениях. Для моделирования эрлифтных биореакторов предложены зависимости для определения циркуляционного расхода в сооружении. Выполнено моделирование по указанным зависимостям для исходных сточных вод г. Макеевка, с разработкой мероприятий по повышению качества очистки путем варьирования параметров работы сооружений и добавлением органического субстрата. Выполнена теоретическая оценка эффективности предложенных схем, ограничений их применения. Установлено, что наиболее значимым параметром для финального качества очистки является соотношение органического вещества, азота и фосфора в исходном стоке.

**Ключевые слова:** биологическая очистка, эрлифтный биореактор, моделирование биохимических процессов активного ила.

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Биологические методы очистки повсеместно используются как для обработки хозяйствственно-бытовых, так и промышленных сточных вод, содержащих органические примеси и соединения биогенных элементов. Существует ряд схем биологической очистки, предназначенных для получения на выходе из очистной станции воды, не вызывающей эвтрофикацию поверхностных водоемов. При этом схемы, отличающиеся высокой эффективностью, являются весьма громоздкими, а их воплощение сопряжено со значительными затратами как на строительство сооружений, так и на обеспечение их функционирования. Одним из наиболее перспективных путей выполнения указанных требований на станциях очистки сточных вод является применение в качестве биоректоров аэротенков с затопленной эрлифтной системой аэрации, которые отличаются высокой эффективностью по использованию кислорода, особым гидродинамическим режимом в сооружении. В настоящее время эти сооружения эффективно используются для очистки сточных вод от органических веществ и соединений азота, в системах обработки осадка, в качестве дополнительных и вспомогательных сооружений в различных схемах. На базе данных сооружений кафедры ВВиОВР ГОУ ВПО ДонНАСА разработана концепция «биологической очистки с эрлифтными биореакторами» («БОСЭБ»). Основным отличительным элементом технологии БОСЭБ (биологическая очистка с эрлифтными биореакторами) являются аэротенки-осветлители с затопленной эрлифтной системой аэрации, обладающие рядом преимуществ относительно других сооружений [1, 2]:

- исключается нитратный рецикл, который, согласно различным источникам [3], составляет до 300 % от расхода сточных вод;
- перемешивание в аноксидной зоне выполняется за счет потока жидкости, созданного эрлифтной циркуляцией в сооружении, что исключает необходимость использования в этой зоне оборудования для механического перемешивания;



- из схемы исключается вторичный отстойник, функции по илоразделению которого выполняет взвешенный слой активного ила внутри аэротенка-осветлителя. Ввиду вихревой рециркуляции взвешенного слоя, ил не пребывает долгое время в аноксидных условиях, что исключит характерный для гравитационного отстаивания выброс фосфатов при илоотделении;

- высокая эффективность илоразделения позволяет повышать концентрацию ила в системе, что положительно скажется на эффективности очистки.

До настоящего времени не был изучен вопрос работы таких сооружений в схемах улучшенного биологического удаления фосфора, что затрудняет возможность использования эрлифтных биореакторов на уровне наилучших доступных технологий.

Целью данной работы является создание теоретических моделей схем биологической очистки сточных вод с применением эрлифтных биореакторов.

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

На основании наиболее распространенных схем биологического удаления фосфора (Кейптаунский процесс MUST и Йоханнесбургский процесс JNB) предложены аналогичные системы, в которых функцию трех характерных сооружений выполняет аэротенк-осветлитель с затопленной эрлифтной системой аэрации (рисунок). Данное сооружение заменяет аэробный, аноксидный реакторы и вторичный отстойник. Схемы предлагаются называть соответственно MUST-ЭБ и JNB-ЭБ, где приставка «-ЭБ» обозначает использование в схеме эрлифтного биореактора в рамках концепции БОСЭБ.

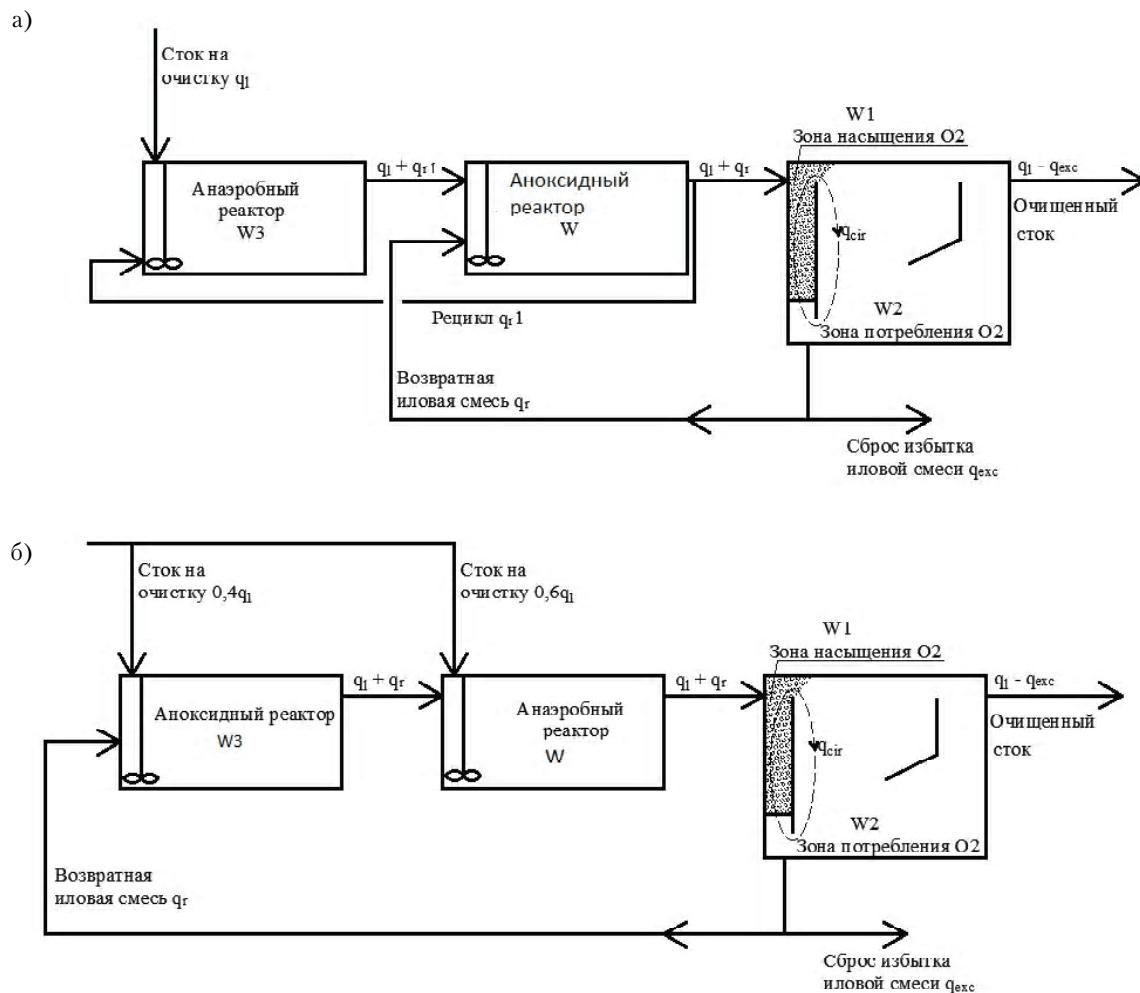


Рисунок – Схемы биологической очистки от соединений азота и фосфора в рамках концепции БОСЭБ: а) на базе схемы MUST; б) на базе схемы JNB.

Для расчета систем биологической очистки сточных вод необходимо оперировать как зависимостями скорости биохимических процессов, так и закономерностями, описывающими гидравлические параметры элементов и реакторов. В совместном решении этих систем, в зависимости от уровня сходимости результатов, лежит задача не только проектирования, но и эксплуатации сооружений биологической очистки сточных вод.

Для расчета и математического описания процессов биологической очистки в настоящее время практикуется ряд методов, которые можно условно поделить на 2 группы: последовательные расчеты и моделирование процессов.

Методы последовательных расчетов заложены в ряд нормативов, действующих в европейских, североамериканских странах [4, 5], ряд отечественных разработок также базируются на способе последовательного расчета сооружений [6, 7].

Данные методы основаны на определении максимальной нагрузки на активный ил, определении минимального возраста ила на основе эмпирических зависимостей. Такие подходы имеют достаточно частный характер и могут быть использованы для предварительных расчетов.

Более современным подходом, используемым в области научных исследований, является моделирование биохимических процессов [8, 9, 10].

Моделирование подразумевает описание процессов биологической очистки сточных вод с помощью биохимических зависимостей (уравнения Моно) [11] с составлением и решением системы дифференциальных уравнений.

Наборы уравнений, описывающих биохимические процессы в системах с активным илом и значения постоянных величин, используемых при моделировании, разрабатывались с 70-х годов прошлого века, первоначально учеными из Южной Африки. В 80-х годах Международная водная ассоциация предложила один из наиболее распространенных в настоящее время подходов – ASM (Activated Sludge Model).

Динамика изменения концентрации каждого компонента описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{dC}{dt} = \sum STK \cdot V, \quad (1)$$

где  $dC$  – элементарное приращение концентрации компонента, мг/л;

$dt$  – дифференциал времени, сут.;

$STK$  – стехиометрический коэффициент для данного компонента в  $i$ -той реакции;

$V$  – скорость реакции, мг/(л·сут).

В общем виде биохимические зависимости всех биохимических процессов в каждом биореакторе схемы представляют из себя систему уравнений (ур-е 2). Расшифровки компонентов представлены в таблице.

**Таблица** – Компонентная схема ASM3+Bio-P

Растворенные компоненты		Нерастворенные компоненты	
Обозн.	Наименование	Обозн.	Наименование
$S_O$	растворенный кислород	$X_I$	инертная нерастворенная органика
$S_S$	легкоокисляемая растворенная органика	$X_S$	биоразлагаемая нерастворенная органика
$S_{NH4}$	азот аммонийный	$X_H$	гетеротрофная биомасса
$S_{NO}$	азот нитратов и нитритов	$X_{STO}$	накопленный внутриклеточный продукт
$S_{N2}$	свободный азот	$X_{PAO}$	биомасса ФАО
$S_{PO4}$	ортфосфаты	$X_{PP}$	полифосфаты
$S_{HCO}$	щелочность	$X_{PHA}$	ПГА
$S_I$	инертная растворенная органика	$X_{AUT}$	автотрофная биомасса
		$X_{TSS}$	взвешенные вещества

Для полного математического описания биологической очистки к уравнениям 2 необходимо добавлять зависимости, характеризующие приток сточных вод на очистку, перетоки между зонами, илоразделение.

К физическим уравнениям, описывающим работу системы БОСЭБ, как предложено выше, относятся следующие группы зависимостей:

1. Уравнения, описывающие количественные параметры притока сточных вод и содержащихся в них примесей, как растворенных, так и нерастворенных.

2. Уравнения, связывающие между собой различные технологические зоны, согласно схеме очистки, включая рециркуляционные, возвратные и сбросные потоки.

3. Уравнения, описывающие илоразделение, которые с учетом эффективности задержания взвешенных веществ, описывают массовый баланс в системе.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS_O}{dt} = f_1(S_S, S_{NH}, S_{PO4}, S_{HCO}, X_H, X_{STO}, X_{PHA}, X_{PAO}, X_A) \\ \frac{dS_S}{dt} = f_2(S_O, S_{NO}, S_{HCO}, X_S, X_H, X_{PP}, X_{PAO}, X_A) \\ \frac{dS_{NH}}{dt} = f_3(S_O, S_S, S_{NO}, S_{PO4}, S_{HCO}, X_S, X_H, X_{PP}, X_{PHA}, X_{PAO}, X_A, X_{STO}) \\ \frac{dS_{NO}}{dt} = f_4(S_O, S_S, S_{NH4}, S_{PO4}, S_{HCO}, X_H, X_{PP}, X_{PHA}, X_{PAO}, X_A, X_{STO}) \\ \frac{dS_{N2}}{dt} = f_5(S_O, S_S, S_{NO}, S_{PO4}, S_{HCO}, X_H, X_{PP}, X_{PHA}, X_{PAO}, X_A, X_{STO}) \\ \frac{dS_{PO4}}{dt} = f_6(S_O, S_S, S_{NO}, S_{NH}, S_{HCO}, X_S, X_H, X_{PP}, X_{PHA}, X_{PAO}, X_A, X_{STO}) \\ \frac{dS_{HCO}}{dt} = f_7(S_O, S_S, S_{NO}, S_{NH}, S_{PO4}, X_S, X_H, X_{PP}, X_{PHA}, X_{PAO}, X_A, X_{STO}) \\ \frac{dS_I}{dt} = f_8(X_S, X_H) \\ \frac{dX_I}{dt} = f_9(S_O, S_{NO}, X_H, X_A) \\ \frac{dX_S}{dt} = f_{10}(X_H) \\ \frac{dX_H}{dt} = f_{11}(S_O, S_{NH4}, S_{NO}, S_{PO4}, S_{HCO}, X_H, X_{STO}) \\ \frac{dX_{STO}}{dt} = f_{12}(S_O, S_S, S_{NH4}, S_{NO}, S_{PO4}, S_{HCO}, X_H) \\ \frac{dX_{PAO}}{dt} = f_{13}(S_O, S_{NH4}, S_{NO}, S_{PO4}, S_{HCO}, X_{PHA}) \\ \frac{dX_{PP}}{dt} = f_{14}(S_O, S_S, S_{PO4}, S_{NO}, S_{HCO}, X_{PHA}, X_{PAO}) \\ \frac{dX_{PHA}}{dt} = f_{15}(S_O, S_S, S_{NH4}, S_{NO}, S_{PO4}, S_{HCO}, X_{PP}, X_{PAO}) \\ \frac{dX_A}{dt} = f_{16}(S_O, S_{NH4}, S_{PO4}, S_{HCO}) \\ \frac{dX_{TSS}}{dt} = f_{17}(S_O, S_S, S_{NH4}, S_{NO}, S_{PO4}, S_{HCO}, X_S, X_H, X_{PP}, X_{PHA}, X_{PAO}, X_A, X_{STO}) \end{array} \right. . \quad (2)$$

Поскольку все эти уравнения войдут в систему с биохимическими зависимостями (2), они должны описывать свои процессы с применением тех же компонентов, что и в биохимических уравнениях.

Приращение концентрации  $i$ -того компонента в первом реакторе за время  $t$  за счет притока в него исходного стока из бесконечного источника определяется по зависимости:

$$\Delta C^i = \frac{t \cdot C_{in}^i \cdot q_1}{W_1}, \text{ г/м}^3 \quad (3)$$

где  $t$  – расчетное время приращения концентрации, сут;

$C_{in}$  – концентрация  $i$ -того компонента в исходном стоке, определенная прямым измерением,  $\text{г/м}^3$ ;

$q_1$  – расход сточных вод, поступающих на очистку,  $\text{м}^3/\text{сут}$ ;

$W_1$  – объем первой расчетной зоны биологической очистки,  $\text{м}^3$ .

Количество уравнений в системе по форме (3) соответствует количеству учитываемых компонентов в исходных сточных водах. В классическом прочтении схемы очистки воды – это 8 зависимостей для ASM3+Bio-P.

По аналогии с уравнением (3), вынос массы из сооружения в размерностях снижения концентрации и поступление этой массы в другое, следующее сооружение очистки описывается двумя уравнениями.

Для сооружения, из которого выходит рассматриваемый  $j$ -тый поток, изменение концентрации составит:

$$\Delta C_j^i = -\frac{t \cdot C_{\text{вых}}^i \cdot q_j}{W_{\text{вых}}}, \text{ г/м}^3 \quad (4)$$

где  $C_{\text{вых}}^i$  – концентрация  $i$ -того компонента в сооружении, откуда выходит рассматриваемый  $j$ -тый поток,  $\text{г/м}^3$ ;

$q_j$  – расход иловой смеси в  $j$ -том потоке,  $\text{м}^3/\text{сут}$ ;

$W_{\text{вых}}$  – объем сооружения, откуда выходит поток,  $\text{м}^3$ .

Знак минус в этой зависимости показывает, что данный поток выносит массу из сооружения. Для сооружения в который входит рассматриваемый  $j$ -тый поток, изменение концентрации составит:

$$\Delta C_j^i = \frac{t \cdot C_{\text{вх}}^i \cdot q_j}{W_{\text{вх}}} \text{ г/м}^3 \quad (5)$$

где  $C_{\text{вх}}^i$  – концентрация  $i$ -того компонента в сооружении, куда входит рассматриваемый  $j$ -тый поток,  $\text{г/м}^3$ ;

$W_{\text{вх}}$  – объем сооружения, куда входит поток,  $\text{м}^3$ .

Сами концентрации в сооружении входа и выхода потока будут являться искомыми величинами при решении общей системы биохимических и гидравлических уравнений. А изменение концентрации должно быть сведено для каждого сооружения согласно аналогу закона Кирхгофа, что исключает эту переменную из системы.

Внутри аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации происходит интенсивная внутренняя циркуляция, характеризующаяся в том числе сменой аэробных и аноксидных зон [12].

В этом случае также можно использовать уравнения (4, 5) для описания обмена масс между зонами, однако возникает вопрос определения циркуляционного расхода и объема этих зон в одном сооружении.

Поскольку биохимические процессы проходят с потреблением кислорода (по мере продвижения циркуляционного потока концентрация кислорода будет снижаться), в расчетной модели принято использовать 2 зоны: зона насыщения кислородом ( $W_{\text{нас}}$ ) и зона потребления кислорода  $W_{\text{потреб}}$ .

Для определения величины циркуляционного расхода была предложена зависимость:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_a = \frac{q_{\text{cir}}}{v_{\text{ж}}} + \frac{Q_{\text{air}}}{v_{\text{ж}}+0,34} \\ h_a - \frac{(h_a - z_1)}{\omega_a} \cdot \left( \frac{q_{\text{cir}}}{v_{\text{ж}}} + \frac{\gamma_{\text{ж}} Q_{\text{air}}}{v_{\text{ж}} \cdot (v_{\text{ж}}+0,34)} \right) - \left[ W_{\text{н}} \cdot \left( \frac{q_{\text{cir}}}{v_{\text{ж}}} + \frac{\gamma_{\text{ж}} Q_{\text{air}}}{v_{\text{ж}} \cdot (v_{\text{ж}}+0,34)} \right) + \frac{W_{\text{ж}} - W_{\text{н}}}{W_{\text{ж}}} \right] h_a + , \\ + \frac{\alpha}{2g} \cdot \left( \frac{q_{\text{cir}} + Q_{\text{air}}}{\omega_a} \right)^2 = \frac{\alpha}{2g} \cdot \left( \frac{q_{\text{cir}}}{\omega_a} \right)^2 + \sum \frac{\zeta_i}{\omega_i^2} \cdot \frac{q_{\text{cir}}^2}{2g} \end{array} \right. \quad 6)$$

где  $q_{\text{cir}}$  – расход иловой смеси, циркулирующей через затопленный эрлифт,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$h_a$  – глубина погружения аэратора,  $\text{м}$ ;

$W_{\text{н}}$  – объем газожидкостной смеси в затопленном эрлифте,  $\text{м}^3$ ;

$W_{\text{ж}}$  – объем газожидкостной смеси над затопленным эрлифтом,  $\text{м}^3$ ;

$\omega_a$  – площадь поперечного сечения затопленного эрлифта,  $\text{м}^2$ ;

$Q_{\text{air}}$  – расход воздуха, поступающий в затопленную эрлифтную систему аэрации,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$z_1$  – глубина погружения верха эрлифтной трубы под уровень свободной поверхности жидкости в биологическом реакторе,  $\text{м}$ ;

$\gamma_{\text{ж}}$  – удельный вес иловой смеси в аэротенке,  $\text{Н/м}^3$ ;

$v_{\text{ж}}$  – средняя скорость течения жидкой фазы газожидкостной смеси в эрлифтной трубе,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$\zeta_i$  – соответствующий коэффициент местного сопротивления на пути циркулирующего потока от выхода из сечения, в котором расположены аэраторы, до входа в это сечение;

$\omega_i$  – занимаемая жидкостью часть поперечной площади потока,  $\text{м}^2$ , в сечении с местным сопротивлением, коэффициент которого составляет  $\zeta_i$ .

Приведенные зависимости позволяют дополнить общую математическую модель БОСЭБ уравнениями обмена масс между зонами насыщения и потребления кислорода по форме уравнений с применением циркуляционного расхода  $q_{cir}$ .

Для реализации теоретической модели всего комплекса сооружений БОСЭБ нами предложено использовать программную среду Cell Designer разработки The Systems Biology Institute, Токио, Япония. Это довольно мощный инструмент биохимического моделирования, который используется в биотехнологии, биологии, медицине [13].

Согласно схеме исследований, приведенной на рисунке, в программной среде Cell Designer созданы 2 модели: МУСТ-ЭБ и JНВ-ЭБ на основе ASM3+Bio-P. Данные исходного стока определены на основании реального стока, отобранного с КНС мкрн. «Калининский» г. Макеевка.

В процессе наладки модели выполнялось варьирование исходных данных для достижения максимального качества очистки. Все варьируемые величины можно разделить на 3 группы: расход воздуха, объемы сооружений и величины рециклов.

Особенностью систем БОСЭБ является тот факт, что воздух используется не только для аэрации, но и для обеспечения внутреннего рецикла и существования взвешенного слоя в осветлителе. Это накладывает ограничения на диапазон варьирования интенсивности аэрации [14], что для характерных сооружений составляет 10...20 м<sup>3</sup>/час/м<sup>2</sup> площади эрлифта. Площадь эрлифта для рассматриваемой системы составляет 0,05 м<sup>2</sup>, что дает требуемый расход воздуха 0,6...1,2 м<sup>3</sup>/час. Именно по минимальному значению принят расход воздуха, что выполнено с целью минимизации затрат.

Далее выполняется анализ необходимости повышения расхода подаваемого воздуха, так, установлено, что в модели МУСТ-ЭБ этого не требуется, а в JНВ-ЭБ может быть рационально.

Если увеличение расхода воздуха до предельного значения не решает систему либо на каком-то этапе наблюдается одновременное превышение ЦТП (целевых технологических показателей) и по азоту аммонийному, и по нитратам, значит варьированием расхода воздуха эту задачу не решить и необходимо менять объемы различных зон.

Варьирование рециклов рекомендуется на завершающем этапе подбора, приведенные значения являются средними, и в основном этот механизм (изменения степеней рециклов) предназначен для оперативного управления системой очистки в условиях изменения качества воды на действующих станциях.

Состав сточных вод КНС мкрн. «Калининский» выдвигает достаточно жесткие условия с учетом неоптимального соотношения БПК: N:P, что может потребовать введения дополнительного органического субстрата либо полного отказа от биологического удаления фосфора с переходом к методам пост-преципитации.

Так, схему МУСТ-ЭБ удалось оптимизировать только увеличением объема анаэробной и аноксидной зон до 0,15 м<sup>3</sup> (что, в принципе, соответствует рекомендациям авторов исходной схемы МУСТ), снижением денитрифицированного рецикла до 2 и добавлением к исходному стоку 30 г/м<sup>3</sup> растворимого органического субстрата при минимальном расходе воздуха.

Установлено, что в случае изначально большего соотношения БПК исходного стока к азоту и фосфору, эта схема вполне применима и обеспечивает биологическое удаление соединений азота и фосфора до параметров, близких к ЦТП.

В случае JНВ-ЭБ схемы, оптимизация также потребовала увеличения объемов анаэробной и аноксидной зон до 0,15 м<sup>3</sup> каждая и добавления тех же 30 г/м<sup>3</sup> растворимого органического субстрата при минимальном расходе воздуха.

Преимуществом JНВ-ЭБ схемы стало отсутствие денитрифицированного рецикла при том же расходе воздуха, объеме сооружений, что делает ее более предпочтительной для внедрения.

Для обеих схем установлено, что увеличение дозы субстрата не ведет к улучшению качества очистки, оно остается практически неизменным при соответствующем увеличении подачи воздуха в систему. Схемы практически идентичны по эффективности очистки.

Текущее значение БПК:N:P составляло 100:22:2.6, что сильно отличается от классического 100:5:1 и объясняет необходимость добавления органического субстрата. При более благоприятных соотношениях, возможно применение предложенных схем без дополнительной органической подпитки.

Предел роста ХПК исходного стока в данных объемах сооружений определяется максимальным расходом воздуха, подаваемым в аэротенк-осветлитель. С помощью составленной модели JНВ-ЭБ определено максимальное приращение ХПК исходного стока, при котором интенсивность аэрации составит критические 20 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>/ч, которое составило порядка 260 г ХПК/м<sup>3</sup>. После этой величины происходит срыв нитрификации и необходимо увеличение объемов аэротенка-осветлителя.

## ВЫВОДЫ

Предложенные схемы биологической очистки с эрлифтными биореакторами МУСТ-ЭБ и JHB-ЭБ, на основании теоретического моделирования, могут обеспечить высокое качество очистки сточных вод по всем целевым показателям при определенном соотношении БПК:Н:Р, в случае нехватки в исходном стоке органического вещества требуется добавление субстрата. Схемы идентичны по эффективности, что делает JHB-ЭБ предпочтительной из-за отсутствия в ней дополнительного рецикла и, соответственно, меньшей затратности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нездойминов, В. И. Биологическая очистка городских сточных вод с эрлифтными биореакторами-осветлителями / В. И. Нездойминов, В. С. Рожков, Д. В. Заворотный. – Текст : непосредственный // Строитель Донбаса. – 2018. – № 4 декабрь. – Р. 17–21.
2. Нездойминов, В. И. Теоретическое обоснование метода одноиловой нитри-денитрификации при очистке сточных вод / В. И. Нездойминов. – Текст : непосредственный // Науковий вісник будівництва. – 2014. – Том 1. – С. 101–105.
3. Есин, М. А. Интенсификация работы сооружений для очистки городских сточных вод от соединений азота и фосфора : специальность 05.23.04 «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Есин Михаил Анатольевич. – Харьков : ХНУСА, 2014. – 196 с. – Текст : непосредственный
4. United States Environmental Protection Agency, Nutrient Control Design Manual. State of Technology Review Report. – Cincinnati, Ohio : Office of Research and Development / National Risk Management Research Laboratory, 2009. – 102 p. – Текст : непосредственный.
5. Standard ATV-DVWK-A 131E. Dimension of Single-Stage Activated Sludge Plants : German ATV-DVWK Rules And Standards : May 2000 / GFA-Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V / Original German edition produced by : DCM, Meckenheim. – 2010. – 58 p. – ISBN 3-933707-41-2. – Текст : непосредственный.
6. Технология удаления азота и фосфора в процессах очистки сточных вод / Б. Г. Мишуков, В. А. Соловьев, В. А. Керов, Л. Н. Зверева. – Санкт-Петербург : Издательство журнала «Вода: технология и экология», 2008. – 144 с. – Текст : непосредственный.
7. Соловьёва, Е. А. Совершенствование технологии удаления азота и фосфора в комплексе по очистке сточных вод и обработке осадка / Е. А. Соловьёва. – Санкт-Петербург : [б. и.], 2010. – 259 с. – Текст : непосредственный.
8. Рожков, В. С. Сравнение подходов к моделированию биологической очистки сточных вод в Украине и других странах / В. С. Рожков, Ю. В. Васильева. – Текст : непосредственный // Опыт и молодость в решении водных проблем : сборник статей 5-ой Восточно-Европейской конференции, Киев, 2013 г. – Киев : [б. и.], 2013. – С. 321–326.
9. Баженов, В. И. Математическое моделирование очистных сооружений с применением погружной техники / В. И. Баженов. – Текст : непосредственный // Сантехника. – 2008. – № 5. – С. 68–71.
10. Баженов, В. И. Критерий оптимизации аэротенков с продольной рециркуляцией иловой смеси «карусельного» типа / В. И. Баженов. – Текст : непосредственный // Экология и промышленность России. – 2008. – Том 12. – С. 20–23.
11. Очистка сточных вод / М. Хенце, П. Армоэс, Й. Ля-Кур-Янсен, Э. Арван ; перевод с английского. – Москва : Мир, 2006. – 480 с. – Текст : непосредственный.
12. Нездойминов, В. И. Исследование допустимой подачи затопленной эрлифтной системы аэрации в аэротенке-осветлителе / В. И. Нездойминов, В. С. Рожков, Д. В. Заворотный. – Текст : электронный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2017. – Выпуск 2017-3(125). – Р. 80–85. – URL: [http://donnasa.ru/publish\\_house/journals/vestnik/2017/vestnik\\_2017-3\(125\).pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2017/vestnik_2017-3(125).pdf) (дата публикации: 30.05.2017).
13. CellDesigner: a graphical biological network editor and workbench interfacing simulator / A. Funahashi, Y. Matsuoka, M. Morohashi [et al.]. – Текст : непосредственный // Introduction to Systems Biology. – Choi : Humana Press, 2007. – Р. 422–434.
14. Заворотный, Д. В. Совершенствование илоотделения в аэротенках-осветлителях с затопленной эрлифтной системой аэрации : специальность 05.23.04 «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Заворотный Дмитрий Викторович ; ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». – Макеевка : ГОУ ВПО «ДонНАСА», 2019. – 151 с. – Текст : непосредственный.

Получена 14.10.2022

Принята 28.10.2022

В. І. НЕЗДОЙМИНОВ, В. С. РОЖКОВ, Ю. В. ВАСИЛЬЄВА  
ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ СХЕМ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ІЗ  
ЗАСТОСУВАННЯМ ЕРЛІФТНИХ БІОРЕАКТОРІВ  
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** У статті наведено опис теоретичних моделей схем покращеного біологічного видалення фосфору, створених на базі Йоганнесбурзького та Кейптаунського процесів, модифікованих використанням аеротенків-освітлювачів із затопленою ерліфтною системою аерації (ерліфтних біореакторів). Запропоновано застосування моделювання біохімічних процесів за допомогою ASM3+Bio-P, що дозволяє описувати взаємне перетворення компонентів системи активного мулу та прогнозувати якість очищення у таких спорудах. Для моделювання ерліфтних біореакторів запропоновано залежності визначення циркуляційної витрати у споруді. Виконано моделювання за вказаними залежностями для вихідних стічних вод м. Макіївка, з розробкою заходів щодо підвищення якості очищення шляхом варіювання параметрів роботи споруд та додаванням органічного субстрату. Виконано теоретичну оцінку ефективності запропонованих схем, обмежень їх застосування. Встановлено, що найбільш значущим параметром для фінальної якості очищення є співвідношення органічної речовини, азоту та фосфору у вихідному стоку.

**Ключові слова:** біологічне очищення, ерліфтний біореактор, моделювання біохімічних процесів активного мулу.

VICTOR NEZDOYMINOV, VITALII ROZHKOV, JULIA VASILIEVA  
THEORETICAL SUBSTANTIATION OF WASTEWATER TREATMENT  
SCHEMES USING AIRLIFT BIOREACTORS  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** The article describes the theoretical models of schemes for improved biological phosphorus removal, created on the basis of the Johannesburg and Cape Town processes, modified by the use of aerotanks-clarifiers with a flooded airlift aeration system (airlift bioreactors). The application of modeling of biochemical processes using ASM3 + Bio-P is proposed, which allows describing the mutual transformation of the components of the activated sludge system and predicting the quality of treatment in such facilities. For modeling airlift bioreactors, dependencies are proposed for determining the circulation flow in the facility. Modeling was carried out according to the indicated dependencies for the initial wastewater of the city of Makeevka, with the development of measures to improve the quality of treatment by varying the parameters of the facilities and adding an organic substrate. A theoretical assessment of the effectiveness of the proposed schemes, limitations of their application is carried out. It has been established that the most significant parameter for the final quality of treatment is the ratio of organic matter, nitrogen and phosphorus in the initial runoff.

**Key words:** biological treatment, gas-loop bioreactor, simulation of activated sludge biochemical processes.

**Нездойминов Віктор Іванович** – доктор техніческих наук, професор; заведуючий кафедрою водоснабження, водоочищення и охрана водних ресурсов ГОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові интереси: біологіческая очистка сточных вод, обработка осадка сточных вод, система транспортирования природных и сточных вод.

**Рожков Виталий Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения, водоочищенння и охрана водних ресурсов ГОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові интереси: біологическая очистка сточных вод, оборотные системы промышленного водоснабжения, очистка природных вод.

**Васильєва Юлія Вячеславовна** – асистент кафедри водоснабжения, водоочищенння и охрана водних ресурсов ГОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові интереси: біологическая очистка сточных вод, оборотные системы промышленного водоснабжения, очистка природных вод.

**Нездоймінов Віктор Іванович** – доктор техніческих наук, професор; завідувач кафедри водопостачання, водовідведення та охорони водних ресурсів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: біологічне очищення стічних вод, обробка осаду стічних вод, система транспортування природних та стічних вод.

**Рожков Віталій Сергійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри водопостачання, водовідведення та охорони водних ресурсів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: біологічне очищення стічних вод, оборотні системи промислового водопостачання, очищення природних вод.

**Васильєва Олія В'ячеславівна** – асистент кафедри водопостачання, водовідведення та охорони водних ресурсів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: біологічне очищення стічних вод, оборотні системи промислового водопостачання, очищення природних вод.

**Nezdoymov Viktor** – Sc. D. (Eng.), Professor, Head of Water Supply, Sanitation and Protection of Water Resources Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: biological wastewater treatment, sewage sludge treatment, natural and wastewater transportation system.

**Rozhkov Vitaliy** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Water Supply, Sanitation and Protection of Water Resources Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: biological wastewater treatment, circulating industrial water supply systems, natural water treatment.

**Vasilieva Yuliya** – Assistant, Water Supply, Sanitation and Protection of Water Resources Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: biological wastewater treatment, circulating industrial water supply systems, natural water treatment.

EDN: RTTOPW

УДК 697.343

**Н. В. ДОЛГОВ**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ С ГЕЛИОКОЛЛЕКТОРОМ**

**Аннотация.** Проведен анализ исследований ведущих ученых с целью определения рациональной методики экспериментальных исследований систем горячего водоснабжения (ГВС) в течение суток для различных видов потребителей тепловой энергии, в частности, для потребителей жилых и общественных зданий. Разработана экспериментальная установка системы горячего водоснабжения с комбинированным источником теплоты на базе гелиоколлектора. На основании проведенных экспериментальных исследований была подтверждена адекватность разработанной математической модели потокораспределения. Разработанная математическая модель потокораспределения контурных расходов в предложенной схеме горячего водоснабжения с комбинированным источником теплоты позволяет определить степень открытия и пределы регулирования балансировочной и регулирующей арматуры в разных режимах работы солнечного коллектора. Произведен расчет эффективности системы горячего водоснабжения с гелиоколлектором для проектируемого объекта типовой секции жилого девятиэтажного здания в программе T-Sol. Даны основные выводы о полученных экспериментальных исследованиях комбинированной системы горячего водоснабжения с гелиоколлектором, а также эффективности и целесообразности применения математической модели потокораспределения методом контурных расходов [1,3].

**Ключевые слова:** горячее водоснабжение, комбинированный источник теплоты, гелиоколлектор, потокораспределение, метод контурных расходов, микроклимат.

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

На сегодняшний день широкое распространение как среди специалистов строительного профиля, так и среди широких слоев населения получили идеи улучшения изоляционных свойств тепловой оболочки зданий и характеристик внутренних и внешних инженерных сетей. Кроме того, продолжается интенсивная разработка новых строительных норм и стандартов, что на законодательном уровне будет способствовать углублению идей энергоэффективности в проектировании конструктивных и инженерных систем зданий и сооружений по европейскому образцу [2].

Использование ископаемых источников энергии, представленных в виде газа и нефти, приводит к загрязнению окружающей среды. Решением данной проблемы является задействование высокотехнологичных инновационных решений, которые бы использовали безграничные запасы энергии, находящиеся вокруг нас. Это такие виды энергии, как солнечная, геотермальная и вся энергия окружающей среды.

### **АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ**

Внимание к созданию комфортных микроклиматических условий в помещениях в мировой практике постоянно растет и обусловлено прежде всего заботами о здоровье человека и повышением производительности его труда. Также на стадии проектирования представляет интерес оценка принятых решений по обеспечению микроклимата помещений для максимальной комфортности человека и повышение его работоспособности.

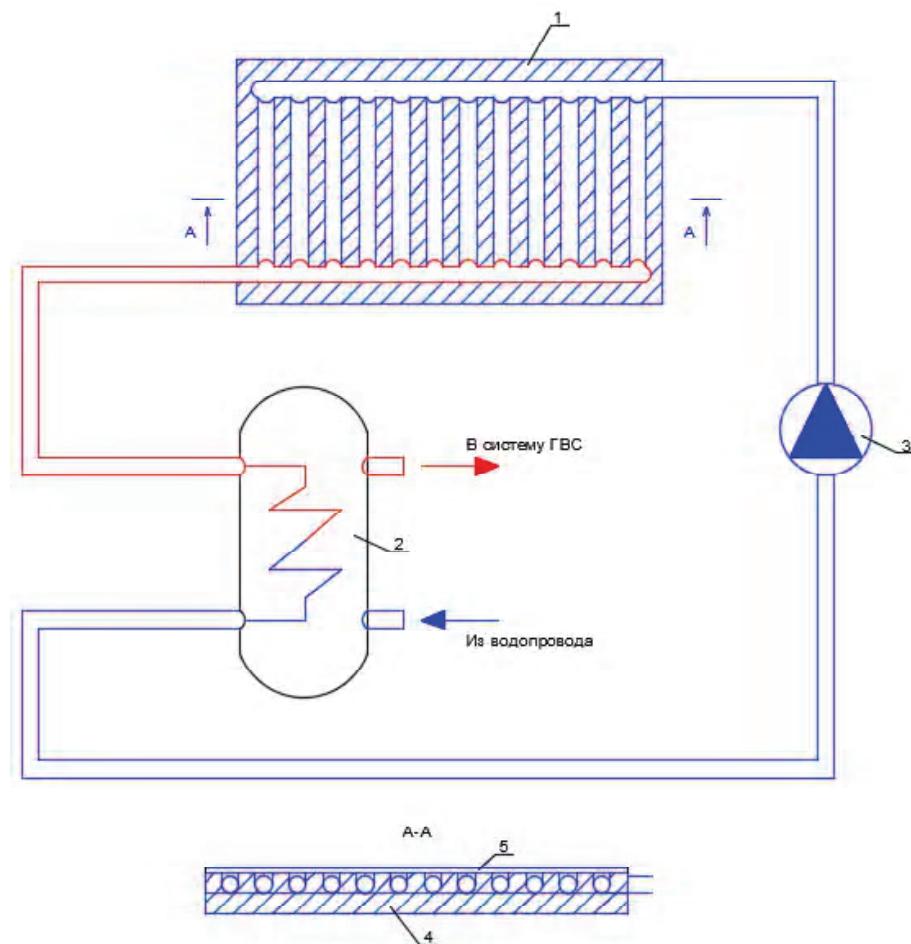


Исходной научной базой при создании критериальных оценок внутренних микроклиматических условий являются работы В. Н. Богословского, Л. Банхиди, Ф. А. Миссенара, Л. В. Павлухина, Л. А. Гвозденко, Ф. Шлейфман и других ученых.

## ЦЕЛЬ

Целью экспериментальных исследований является проверка адекватности разработанной математической модели потокораспределения в системе горячего водоснабжения с комбинированным источником тепла [4, 5].

С этой целью были проведены экспериментальные исследования распределения потоков теплоносителя и давления в системе ГВС с гелиоколлектором и баком-аккумулятором (рисунок 1).



## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Экспериментальная установка представлена гелиоколлектором, баком-аккумулятором, циркуляционным насосом.

Гелиоколлектор выполнен из стеклянных трубок черного цвета толщиной 10 мм, теплоизолированных от поверхности крыши теплоизоляционным слоем (базальтовой ватой).

*Методика проведения исследований характеристик тепловых потоков.*

Перед началом эксперимента и в конце его проведения фиксируются следующие параметры:

- температура воды на входе;
- расход воды;
- температура воды на выходе;

- тепловосприятие коллектора;
- интенсивность полной солнечной радиации;
- КПД коллектора.

Параметры установки определяются при различных расходах и температурах наружного воздуха для всех энергопотребляющих контуров. Для стабильной работы системы горячего водоснабжения с комбинированным источником теплоты предусматривается установка запорной и регулирующей арматуры [6, 7].

Испытания проводятся при установленном температурном и гидравлическом режиме в системе горячего водоснабжения с гелиоколлектором. Интервал снятия показаний с измерительных приборов составляет 60 мин. Испытания проводятся для значения расхода горячей воды – 0,12 кг/с.

Получение достоверных данных исследуемого контура системы ГВС зависит от правильности выбора контрольно-измерительной арматуры, которая обеспечивает: заданную точность исследуемых измерений, стабильность работы при воздействии неизбежных внешних факторов.

Использовались следующие измерительные приборы:

- для измерения температур использовались биметаллические термометры ТБ – 150, класс точности 2,5;
- фиксация расходов осуществлялась счетчиками воды КВ – 1,5, класс точности 2;
- для определения температуры поверхности солнечного коллектора (СК) использовался пирометр (инфракрасный термометр) GM320, –50...+380 °C, класс точности 1,5.

#### *Проведение экспериментальных исследований КПД гелиоколлектора.*

На представленной установке был проведен эксперимент по определению теплотехнических характеристик рассматриваемой схемы, а также определен КПД гелиоколлектора. Экспериментальные данные представлены в таблицах 1–3. Исследования проводились в апреле, июле и сентябре 2021 г. в г. Донецк. Выбор месяцев обусловлен началом и концом отопительного периода, когда остается только нагрузка на горячее водоснабжение.

**Таблица 1** – Экспериментальные данные по определению КПД гелиоколлектора (апрель)

Время, часы	Температура воды на входе °C	Расход теплоносителя, кг/с	Температура воды на выходе °C	Тепловосприятие коллектора, Вт	Интенсивность полной солнечной радиации, Вт	КПД %
5.00	14	0,12	30	288,35	365	79
6.00	14	0,12	31	354,24	432	82
7.00	14	0,12	40	328,5	450	73
8.00	14	0,12	42	410,8	520	79
9.00	14	0,12	45	551,04	672	82
10.00	14	0,12	50	498,1	586	85
11.00	14	0,12	53	489,8	620	79
12.00	14	0,12	60	468,66	642	79
13.00	14	0,12	65	569,9	695	82
14.00	14	0,12	63	474,66	586	81
15.00	14	0,12	62	451,88	572	79
17.00	14	0,12	43	368	460	80
18.00	14	0,12	39	331,8	420	79

На основании данных проведенных экспериментальных исследований построены графики зависимости КПД коллектора от его тепловосприятия в период работы установки в течение суток (рисунки 2–4).

Для каждой выборки экспериментальных значений была применена гипотеза о нормальности распределения данных. Согласно центральной предельной теореме, доверительный интервал вычисляется по формуле

$$\bar{x} - t_{\gamma} \frac{s}{\sqrt{n}} \leq a \leq \bar{x} + t_{\gamma} \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (1)$$

**Таблица 2 – Экспериментальные данные по определению КПД гелиоколлектора (июль)**

Время, часы	Температура воды на входе °C	Расход теплоносителя, кг/с	Температура воды на выходе °C	Тепловосприятие коллектора, Вт	Интенсивность полной солнечной радиации, Вт	КПД, %
5.00	9	0,12	30	184,69	253	73
6.00	9	0,12	31	221,4	270	82
7.00	9	0,12	40	219,73	301	73
8.00	9	0,12	42	276,5	350	79
9.00	9	0,12	45	303,4	370	82
10.00	9	0,12	50	340	400	85
11.00	9	0,12	53	364,5	450	81
12.00	9	0,12	60	359,89	493	73
13.00	9	0,12	65	437,75	515	85
14.00	9	0,12	63	315,9	390	81
15.00	9	0,12	62	279,66	354	79
17.00	9	0,12	43	257,6	322	80
18.00	9	0,12	39	240,95	305	79

**Таблица 3 – Экспериментальные данные по определению КПД гелиоколлектора (сентябрь)**

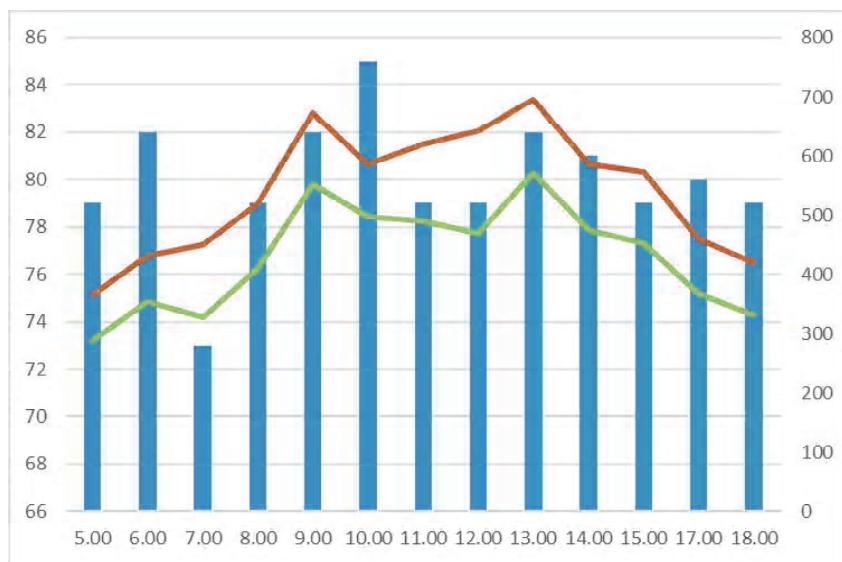
Время, часы	Температура воды на входе °C	Расход теплоносителя, кг/с	Температура воды на выходе °C	Тепловосприятие коллектора, Вт	Интенсивность полной солнечной радиации, Вт	КПД, %
5.00	9	0,12	30	184,69	253	73
6.00	9	0,12	31	221,4	270	82
7.00	9	0,12	40	219,73	301	73
8.00	9	0,12	42	276,5	350	79
9.00	9	0,12	45	303,4	370	82
10.00	9	0,12	50	340	400	85
11.00	9	0,12	53	364,5	450	81
12.00	9	0,12	60	359,89	493	73
13.00	9	0,12	65	437,75	515	85
14.00	9	0,12	63	315,9	390	81
15.00	9	0,12	62	279,66	354	79
17.00	9	0,12	43	257,6	322	80
18.00	9	0,12	39	240,95	305	79

где  $\bar{x}$  – выборочное среднее значение; $t_{\alpha/2}$  – квантиль распределения Стьюдента уровня значимости  $\alpha = 0,95$  при уровне свободы $f = n - 1$ ,  $t_{\alpha/2}$  – принимаем равной 1,96; $a$  – среднее значение генсовокупности; $s$  – выборочное среднеквадратичное отклонение; $n$  – число элементов выборки.

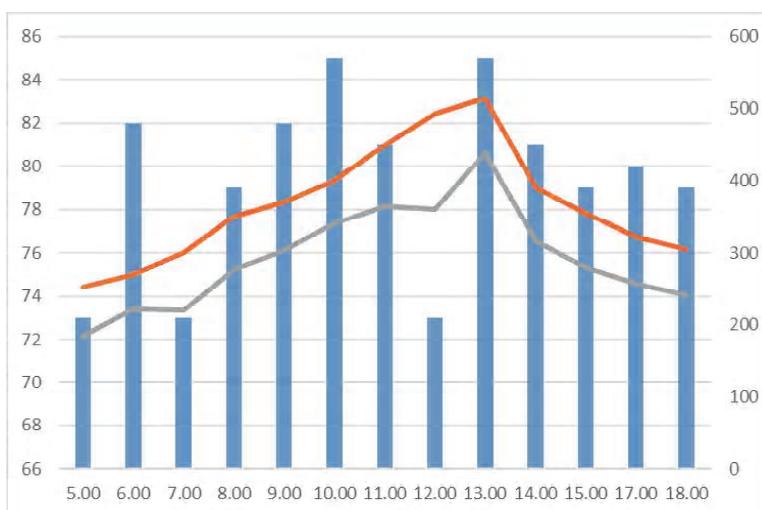
Использованная методика проведения эксперимента дала возможность обосновать теоретические предпосылки и получить исходные данные для оптимизации параметров работы системы ГВС с комбинированным источником тепла.

Расчет эффективности системы горячего водоснабжения с гелиоколлектором в программе T-Sol.

Расчет производился в программе T-Sol для проектируемого объекта типовой секции жилого девятиэтажного здания.



**Рисунок 2** – Значение тепловосприятия коллектора и его КПД в период работы установки солнечного коллектора в течение суток (апрель).



**Рисунок 3** – Значение тепловосприятия коллектора и его КПД в период работы установки солнечного коллектора в течение суток (июль).

T-Sol – программа для проектирования и проведения симуляционных расчетов систем горячего водоснабжения, вспомогательного водяного отопления на основе солнечных тепловых коллекторов (рисунок 5).

Для проведения расчетов создаем новый проект и выбираем месторасположение объекта.

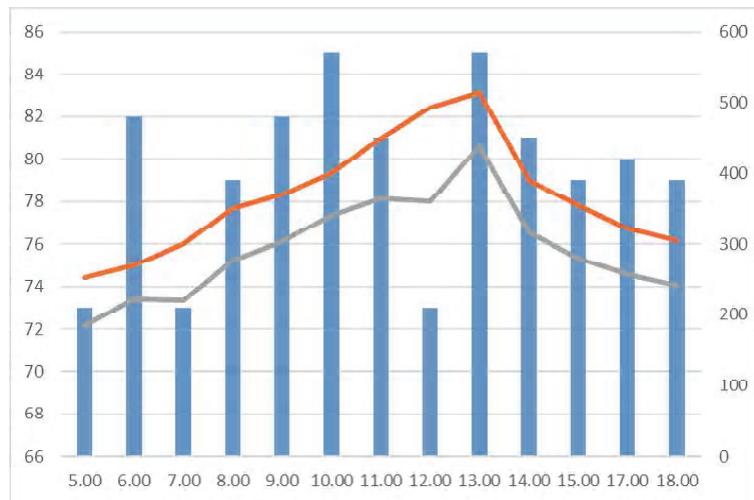
Расчет параметров позволяет получить данные по энергии солнечного излучения в течение месяца и года. В программе осуществляется расчет для следующих типов ориентации поверхности: горизонтальной, наклонной под углом.

Проведение симуляционных расчетов выработка СК для нужд систем ГВС в течение любого периода по выбору до года рисунок 6.

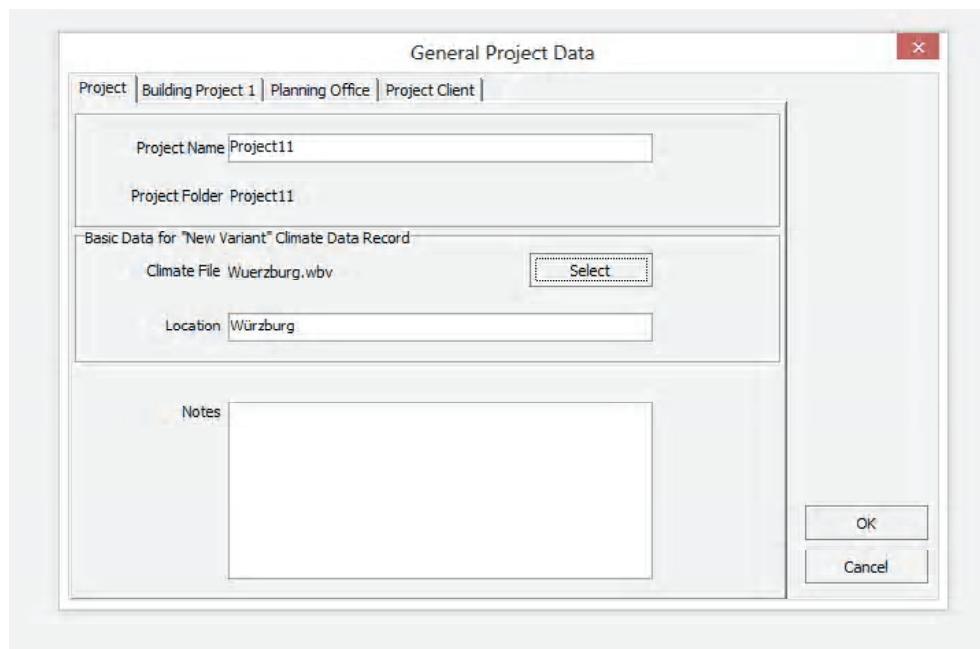
Для проведения расчетов задаемся параметрами:

- площадь здания;
- температура воды для ГВС;
- расход воды.

В программе есть наличие базы данных основного оборудования мировых производителей СК и баков накопителей (БН), также готовые системы для проектирования систем ГВС:



**Рисунок 4** – Значение тепловосприятия коллектора и его КПД в период работы установки солнечного коллектора в течение суток (сентябрь).



**Рисунок 5** – Интерфейс программы T-Sol.

- Расчет оптимальной площади поверхности СК и объема бака накопителя.
  - Расположение СК на объекте с учетом максимизации выработки и минимизации затенения.
  - Учет затенения поверхности СК от близлежащих препятствий.
  - Проведение сравнительных расчетов различных вариантов компоновки системы на базе СК в рамках одного проекта.
    - Расчет показателей экологической эффективности.
    - Расчет основных технических показателей, характеризующий эффективность системы на базе СК.
    - Расчет показателей, характеризующих экономическую эффективность проекта.
- Результаты моделирования в компьютерной программе T-Sol (рисунок 7) позволяют сделать вывод о том, что наиболее эффективным вариантом размещения солнечного коллектора для комбинированной системы горячего водоснабжения для выбранного проекта здания (г. Донецк, ул. Артема, 280) является СК, ориентированный на северо-запад с углом наклона 30°.

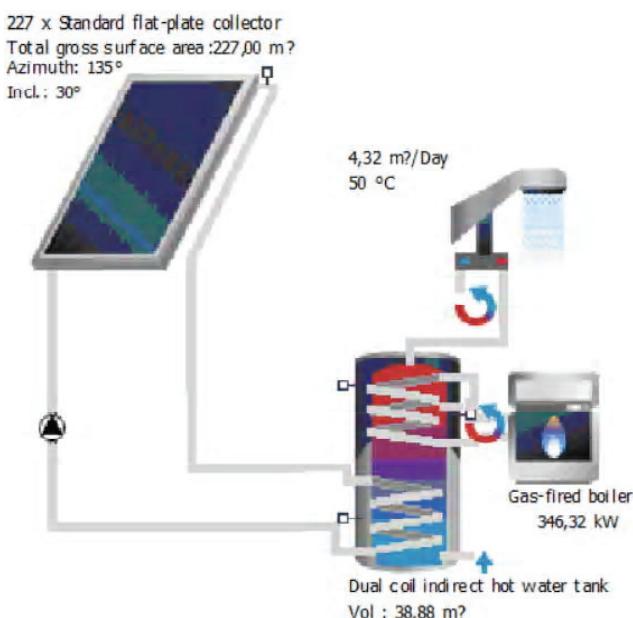


Рисунок 6 – Выбор симуляционных расчетов системы ГВС с гелиоколлектором.

### Results of annual simulation

Installed collector power:	158,90 kW
Installed solar surface area (gross):	227 m <sup>2</sup>
Irradiation on collector surface (active):	216 185,81 kWh
Energy delivered by collectors:	42 098,45 kWh
Energy delivered by collector loop:	40 446,06 kWh
DHW heating energy supply:	35 730,38 kWh
Solar energy contribution to DHW:	38 011,86 kWh
Energy from auxiliary heating:	3 508,3 kWh
<b>Natural gas (H) savings:</b>	<b>0,0 m<sup>3</sup></b>
<b>CO<sub>2</sub> emissions avoided:</b>	<b>12 545,35 kg</b>
<b>DHW solar fraction:</b>	<b>91,6 %</b>
<b>Relative savings of supplementary energy (DIN EN 12977):</b>	<b>90,9 %</b>
<b>System efficiency:</b>	<b>17,6 %</b>

Рисунок 7 – Результаты экспериментального исследования.

Построен график потребления солнечной энергии и общее потребление системы солнечной котельной при совместной работе с газовым котлом в летний период года (рисунок 8).

Из графика видно, что в летнее время можно отключить газовую котельную и снабжать горячей водой потребителей, используя только солнечные коллекторы.

С помощью программы построен график максимальной температуры коллектора в течение года (рисунок 9).

Из графика видно, что максимальный нагрев коллектора достигает температуры 85°.

В ходе работы построена энергетическая схема работы солнечной тепловой котельной (рис. 10).

График, характеризующий совместную работу солнечного коллектора с дополнительным нагревом горячей воды в газовой котельной, представлен на рисунке 11.

### Solar energy consumption as percentage of total consumption

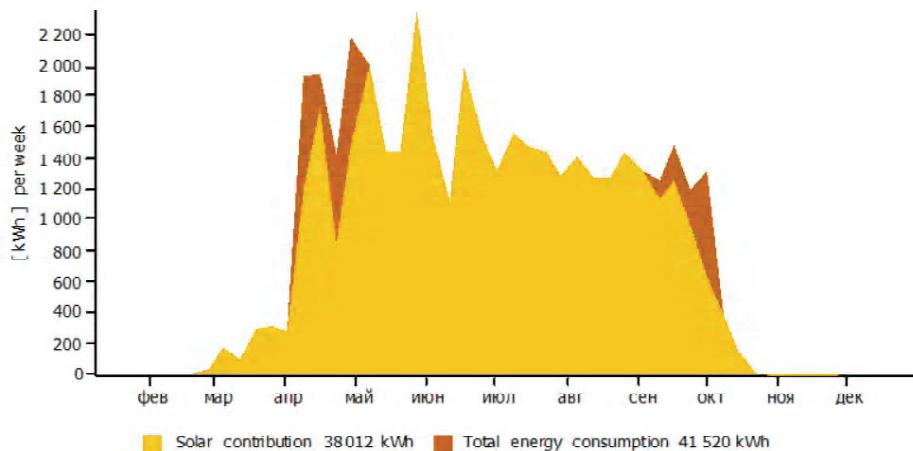


Рисунок 8 – График теплопроизводительности солнечно-газовой котельной 38 011,86 кВт·ч, покрытие солнечной тепловой энергии – 35 730,38 кВт·ч, нагрузка на дополнительный подогрев – 3 508,3 кВт·ч.

### Daily maximum collector temperature

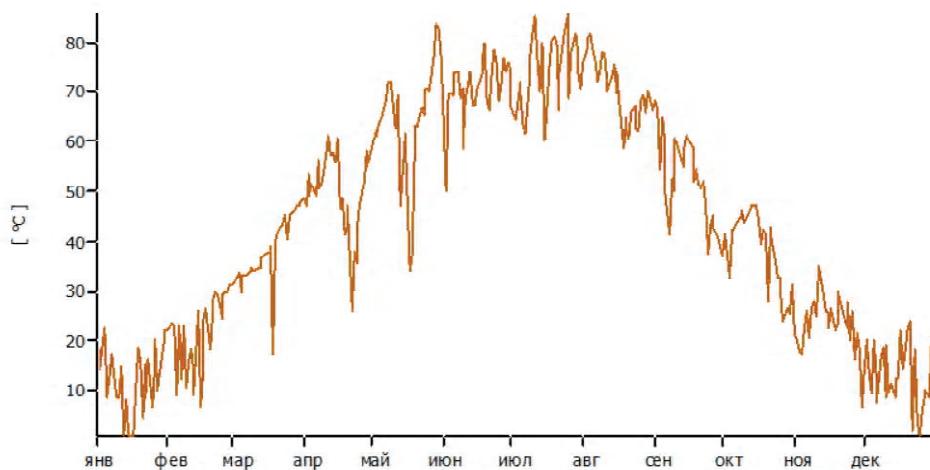


Рисунок 9 – График максимальной температуры коллектора в течение года.

На основе анализа графика, характеризующего совместную работу солнечной котельной с дополнительным нагревом горячей воды в газовой котельной, можно сделать вывод о том, что в период эксплуатации рассматриваемой системы с апреля по сентябрь КПД работы вспомогательной системы составил всего 18 %, при этом наблюдаются значительное сокращение выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу (12 545 кг) и экономия природного газа (5 933 м<sup>3</sup>).

### ВЫВОДЫ

С целью проверки адекватности разработанной математической модели потокораспределения в системе горячего водоснабжения с комбинированным источником тепла были проведены экспериментальные исследования распределения потоков теплоносителя и давления в системе ГВС с гелиоколлектором и баком-аккумулятором.

На представленной установке был проведен эксперимент по определению теплотехнических характеристик рассматриваемой схемы, а также определен КПД гелиоколлектора. Исследования проводились в апреле, июле и сентябре в г. Донецк.

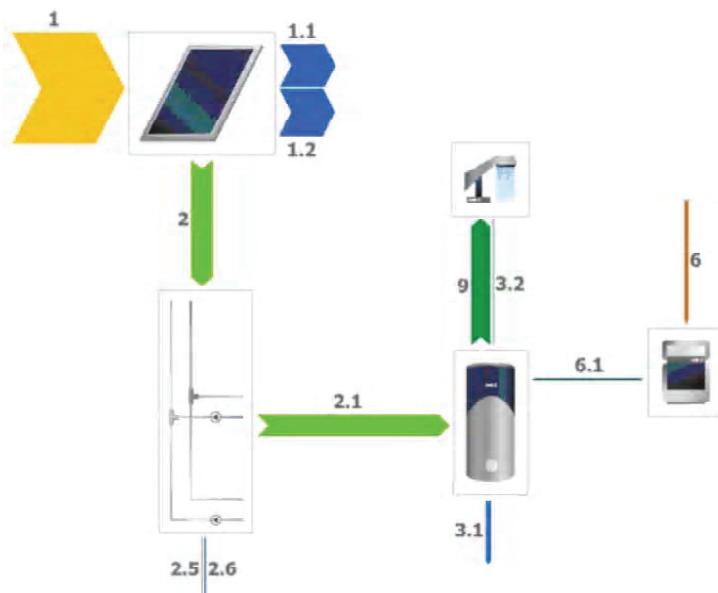
**Energy balance schematic**

Рисунок 10 – Энергетическая схема солнечной тепловой котельной.

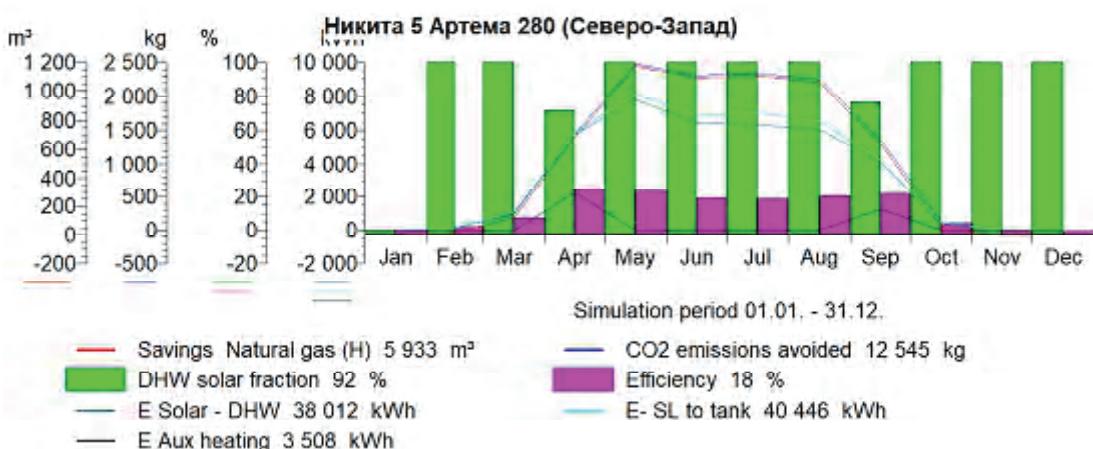


Рисунок 11 – Совместная работа солнечной котельной с дополнительным подогревом воды в газовой котельной.

В работе произведен расчет эффективности системы горячего водоснабжения с гелиоколлектором для проектируемого объекта типовой секции жилого девятиэтажного здания в программе T-Sol.

Результаты моделирования в компьютерной программе T-Sol позволили сделать вывод о том, что наиболее эффективным вариантом размещения солнечного коллектора для комбинированной системы горячего водоснабжения для выбранного проекта здания (г. Донецк, ул. Артема, 280) является СК, ориентированный на северо-запад с углом наклона 30°.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- Методы и алгоритмы расчета тепловых сетей / В. Я. Хасилев, А. П. Меренков, Б. М. Каганович [и др.] ; под редакцией В. Я. Хасилева и А. П. Меренкова. – Москва : Энергия, 1978. – 176 с. – Текст : непосредственный.
- Ahuja, R. K. Network Flows: Theory, Algorithms and Applications / R. K. Ahuja, T. L. Magnanti, J. B. Orlin. – Prentice Hall, New Jersey, 1993. – 863 p. – Текст : непосредственный.
- Меренков, А. П. Теория гидравлических цепей / А. П. Меренков, В. Я. Хасилев. – Москва : Наука, 1985. – 277 с. – Текст : непосредственный.
- Руководство по проектированию систем солнечного теплоснабжения Viessmann. – Киев : Злато-Граф, 2010. – 189 с. – Текст : непосредственный.

5. Koronakis, P. S. On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area / P. S. Koronakis. – DOI: 10.1016/0038-092x(86)90137-4. – Текст : непосредственный // Solar Energy. – 1986. – Volume 36, № 3. – Р. 217–225.
6. Спирин, Н. А. Методы планирования и обработки результаты инженерного эксперимента : конспект лекций / Н. А. Спирин, В.В. Лавров. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2004. – 257 с. – Текст : непосредственный.
7. Шашков, В. Б. Прикладной регрессионный анализ. Многофакторная регрессия: учебное пособие / В. Б. Шашков. – Оренбург : ГОУ ВПО ОГУ, 2003. – 363 с. – Текст : непосредственный.

Получена 19.10.2022

Принята 28.10.2022

М. В. ДОЛГОВ

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТОКОРОЗПОДІЛУ В  
КОМБІНОВАНІЙ СИСТЕМІ ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ З  
ГЕЛІОКОЛЕКТОРОМ

ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** Проведено аналіз досліджень провідних вчених з метою визначення раціональної методики експериментальних досліджень систем гарячого водопостачання протягом доби для різних видів споживачів теплової енергії, зокрема для споживачів житлових та громадських будівель. Розроблено експериментальну установку системи гарячого водопостачання з комбінованим джерелом теплоти на базі геліоколектора. На підставі проведених експериментальних досліджень було підтверджено адекватність розробленої математичної моделі потокорозподілу. Розроблена математична модель потокорозподілу контурних витрат у запропонованій схемі ГВП з комбінованим джерелом теплоти дозволяє визначити ступінь відкриття та межі регулювання балансувальної та регулюальної арматури в різних режимах роботи сонячного колектора. Здійснено розрахунок ефективності системи гарячого водопостачання з геліоколектором для проектованого об'єкта типової секції житлової дев'ятиповерхової будівлі у програмі T-Sol. Дано основні висновки про отримані експериментальні дослідження комбінованої системи гарячого водопостачання з геліоколектором, а також ефективність та доцільність застосування математичної моделі потокорозподілу методом контурних витрат [1, 3].

**Ключові слова:** гаряче водопостачання, комбіноване джерело теплоти, геліоколектор, потокорозподіл, метод контурних витрат, мікроклімат.

NIKOLAI DOLGOV

EXPERIMENTAL STUDIES OF FLOW DISTRIBUTION IN A COMBINED HOT  
WATER SUPPLY SYSTEM WITH A SOLAR COLLECTOR  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** An analysis of the research of leading scientists was carried out in order to determine a rational methodology for experimental studies of hot water supply systems during the day for various types of thermal energy consumers, in particular for consumers of residential and public buildings. An experimental installation of a hot water supply system with a combined heat source based on a solar collector has been developed. On the basis of the conducted experimental studies, the adequacy of the developed mathematical model of flow distribution was confirmed. Therefore, the developed mathematical model of the flow distribution of circuit flow rates in the proposed DHW scheme with a combined heat source makes it possible to determine the degree of opening and the limits of regulation of balancing and control valves in different operating modes of the solar collector. The efficiency of a hot water supply system with a solar collector was calculated for the projected object of a typical section of a nine-story residential building in the T-Sol program. The main conclusions are given about the obtained experimental studies of a combined hot water supply system with a solar collector, as well as the effectiveness and expediency of using a mathematical model of flow distribution by the loop flow method [1, 3].

**Key words:** hot water supply, combined heat source, solar collector, flow distribution, loop flow method, microclimate.

**Долгов Николай Викторович** – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергосбережение в системах теплогазоснабжения и вентиляции.

**Долгов Микола Вікторович** – кандидат технічних наук, доцент; доцент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергозбереження в системах теплогазопостачання і вентиляції.

**Dolgov Nikolai** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor; Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: heatsaving in systems of a heat – gassupply and ventilation..

---

## СОДЕРЖАНИЕ

АНДРИЙЧУК В. Н., СОКОЛОВ В. И., АНДРИЙЧУК Н. Д. Управление системами отопления, вентиляции и кондиционирования на основе MPC-подхода	5
МАРКИН В. В. Перспективы применения процесса ANAMMOX для очистки городских сточных вод	14
РАДИОНЕНКО В. Н. О перспективах использования нечётких обобщённых критериев для определения качества окружающей среды на примере теплоэлектростанций	21
УДОВИЧЕНКО З. В., САВИЧ Д. В., ДЕМЕШКИН В. П. Очистка и утилизация теплоты отходящих газов в аппаратах с зернистым слоем в промышленности строительных материалов	27
ТУРЧИНА Г. С. Повышение надежности водопроводной сети путем резервирования ее элементов	34
ЧЕРНЫШЕВ В. Н., МОГУКАЛО А. В., РУЧКА В. В. Аэробная стабилизация смеси сырого осадка и неуплотненного активного ила с рециркуляцией иловой воды	43
ПАВЛЮЧЕНКО А. С., ГРИГОРЕНКО Н. И. Методы борьбы с гидроударом на насосных станциях путем рациональной обвязки технологического оборудования	50
ШЕЙХ А. А. Анализ влияния процесса переработки отходов строительства на величину загрязнения атмосферного воздуха	56
БАШЕВАЯ Т. С. Анализ подходов к решению проблемы твердых коммунальных отходов	62
КРАЛИН А. К., МАКЕЕВА Д. А., АСЕЕВ Д. Г. Минимизация антропогенного воздействия на окружающую среду при механизированном распределении противогололедных материалов	68
КОЛОСОВА Н. В. Эффективность применения реактора для предварительного подогрева биомассы в биогазовой установке	77
ГОЛОВАЧ Ю. А., МИХАЙСКАЯ О. В., ВОЖОВА Н. А. Повышение эффективности сжигания газового топлива в горелках инфракрасного излучения светлого типа	83
НЕЗДОЙМИНОВ В. И., РОЖКОВ В. С., ВАСИЛЬЕВА Ю. В. Теоретическое обоснование схем очистки сточных вод с применением эрлифтных биореакторов	89
ДОЛГОВ Н. В. Экспериментальные исследования потокораспределения в комбинированной системе горячего водоснабжения с гелиоколлектором	98

Статьи, публикуемые в журнале «Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры», размещены

- в российской информационно-аналитической системе –  
Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)
- в электронно-библиотечной системе IPRbooks
- в информационно-поисковой системе Google Scholar.

---

## ЗМІСТ

АНДРІЙЧУК В. М., СОКОЛОВ В. І., АНДРІЙЧУК М. Д. Управління системами опалення, вентиляції і кондиціонування на основі MPC-підходу	5
МАРКІН В. В. Перспективи застосування процесу ANAMMOX для очищення міських стічних вод	14
РАДІОНЕНКО В. М. Про перспективи використання нечітких узагальнених критеріїв для визначення якості навколишнього середовища на прикладі теплоелектростанцій	21
УДОВИЧЕНКО З. В., САВІЧ Д. В., ДЕМЕШКІН В. П. Очищення та утилізація теплоти відходів газів в апаратах із зернистим шаром у промисловості будівельних матеріалів	27
ТУРЧИНА Г. С. Підвищення надійності водопровідної мережі шляхом резервування її елементів	37
ЧЕРНИШЕВ В. М., МОГУКАЛО А. В., РУЧКА В. В. Аеробна стабілізація суміші сирого осаду й неущільненого активного мулу з рециркуляцією мулової води	43
ПАВЛЮЧЕНКО О. С., ГРИГОРЕНКО Н. І. Методи боротьби з гідроударом на насосних станціях шляхом раціональної обв'язки технологічного обладнання	50
ШЕЙХ О. О. Аналіз впливу процесу переробки відходів будівництва на величину забруднення атмосферного повітря	56
БАШЕВА Т. С. Аналіз підходів до вирішення проблеми твердих комунальних відходів	62
КРАЛІН А. К., МАКЕЄВА Д. О., АСЄЄВ Д. Г. Мінімізація антропогенного впливу на навколишнє середовище при механізованому розподілі протиожеледних матеріалів	68
КОЛОСОВА Н. В. Ефективність застосування реактора для попереднього підігріву біомаси в біогазовій установці	77
ГОЛОВАЧ Ю. О., МИХАЙСЬКА О. В., ВОЖОВА Н. А. Підвищення ефективності спалювання газового палива в пальниках інфрачервоного випромінювання світлого типу	83
НЕЗДОЙМІНОВ В. І., РОЖКОВ В. С., ВАСИЛЬЄВА Ю. В. Теоретичне обґрунтування схем очищення стічних вод із застосуванням ерліфтних біореакторів	89
ДОЛГОВ М. В. Експериментальні дослідження потокорозподілу в комбінованій системі гарячого водопостачання з геліоколектором	98

Статті, що публікуються у журналі «Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури», розміщені

- в російській інформаційно-аналітичній системі – Російський індекс наукового цитування (РІНЦ)
- в електронно-бібліотечній системі IPRbooks
- в інформаційно-пошуковій системі Google Scholar.

---

## CONTENTS

ANDRIICHUK VLADISLAV, SOKOLOV VLADIMIR, ANDRIICHUK NIKOLAI. Control for Systems of Heating, Ventilation and Air Conditioning Based on the MPC-Approach	5
MARKIN VYACHESLAV. Prospects for the Application of the ANAMMOX Process for Urban Wastewater Treatment	14
RADIONENKO VITALY. On the Prospects for the use of Fuzzy Generalized Criteria for Determining the Quality of the Environment on the Example of Thermal Power Plants	21
UDOVICHENKO ZLATA, SAVICH DARYA, DEMESHKIN VALENTIN. Purification and Utilization of the Heat of Exhaust Gases in Apparatuses with a Granular Bed in the Building Materials Industry	27
TURCHINA GALINA. Improving the Reliability of the Water Supply Network by Redundancing its Elements	34
CHERNYSHEV VALENTIN, MOGUKALO ANASTASIA, PUCHKA VLADISLAV. Aerobic Stabilization of a Mixture of Crude Sludge and Non-Compacted Activated Sludge with Sludge Water Recirculation	43
PAVLUCHENKO ALEKSANDR, GRIGORENKO NADEZHDA. Methods of Combating Water Hammer at Pumping Stations by Rational Strapping of Technological Equipment	50
SHEIKH ALEXANDRA. Analysis of the Impact of the Process of Processing Construction Waste on the Amount of Atmospheric air Pollution	56
BASHEVAYA TATIANA. Analysis of Ways to Solve the Problem of Municipal Solid Waste	62
KRALIN ANDREY, MAKEJEVA DARIA, ASEEV DMITRY. Minimization of Anthropogenic Impact on the Environment with Mechanized Distribution of Anti-Ice Materials	68
KOLOSOVA NELLI. Efficiency of Using a Reactor for Preheating Biomass in a Biogas Plant	77
GOLOVACH YULIA, MIKHAYSKAYA OKSANA, VOZHOVA NATALIA Increasing of the Efficiency of Gas Fuel Combustion in Light Type Infrared Burners	83
NEZDOYMINOV VICTOR, ROZHKO VITALII, VASILIEVA JULIA. Theoretical Substantiation of Wastewater Treatment Schemes Using Airlift bioreactors	89
DOLGOV NIKOLAI. Experimental Studies of Flow Distribution in a Combined Hot Water Supply System with a Solar Collector	98

The articles published in journal «Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture» are indexed by:

- the Russian Information and Analytical System – Russian Science Citation Index (RSCI)
- the electronic-library system IPRbooks
- the search engine Google Scholar.