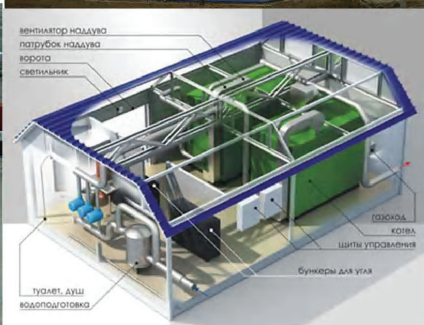


ВЕСТНИК

ДОНБАССКОЙ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ



ВЫПУСК 2017-5(127)

**ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И
ТЕХНОГЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

ГОУ ВПО "Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры"

ВЕСТНИК

**Донбасской национальной академии
строительства и архитектуры**

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Издается с декабря 1995 года
Выходит 8 раз в год

Выпуск 2017-5(127)

**ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ
И ТЕХНОГЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

Макеевка 2017

ДООУ ВПО “Донбаська національна академія
будівництва і архітектури”

ВІСНИК

**Донбаської національної академії
будівництва і архітектури**

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

Видається з грудня 1995 року
Виходить 8 разів на рік

Випуск 2017-5(127)

**ІНЖЕНЕРНІ СИСТЕМИ
ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА**

Макіївка 2017

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 № 2 от 30.10.2017 г.

Редакционный совет:

Горохов Е. В., д. т. н., профессор – главный редактор;

Мушанов В. Ф., д. т. н., профессор – зам. гл. редактора (научный редактор);

Югов А. М., д. т. н., профессор – технический редактор;

Лукиянов А. В., д. т. н., профессор – ответственный редактор выпуска.

Редакционная коллегия:

Андрийчук Н. Д., д. т. н., профессор;

Высоцкий С. П., д. т. н., профессор;

Горохов Е. В., д. т. н., профессор;

Куликов Н. И., д. т. н., профессор;

Лукиянов А. В., д. т. н., профессор;

Мушанов В. Ф., д. т. н., профессор;

Найманов А. Я., д. т. н., профессор;

Насонкина Н. Г., д. т. н., профессор;

Нездойминов В. И., д. т. н., профессор;

Олексюк А. А., д. т. н., профессор;

Сердюк А. И., д. т. н., профессор;

Удовиченко З. В., к. т. н., доцент.

Корректоры Л. М. Лещенко, Е. В. Гнездилова

Программное обеспечение С. В. Гавенко

Компьютерная верстка Е. А. Солодкова

Подписано к выпуску 20.11.2017

Адрес редакции и издателя

86123, ДНР, г. Макеевка, ул. Державина, 2,

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

Телефоны: (0622) 90-29-38; (0623) 22-20-51, (0623) 22-24-67

Тел/факс: (0623) 22-06-16, E-mail: 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», 2017

Засновник і видавець

ДООУ 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
ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»
Протокол № 2 від 30.10.2017 р.

Редакційна рада:

Горохов Є. В., д. т. н., професор – головний редактор;
Мушанов 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;	Найманов А. Я., д. т. н., професор;
Висоцький С. П., д. т. н., професор;	Насонкина Н. Г., д. т. н., професор;
Горохов Є. В., д. т. н., професор;	Нездоймінов В. І., д. т. н., професор
Куліков М. І., д. т. н., професор;	Олексюк А. О., д. т. н., професор;
Лук'янов О. В., д. т. н., професор;	Сердюк О. І., д. т. н., професор;
Мушанов В. П., д. т. н., професор;	Удовиченко З. В., к. т. н., доцент.

Коректори Л. М. Лещенко, О. В. Гнездилова
Програмне забезпечення С. В. Гавенко
Комп'ютерне верстання Є. А. Солодкова

Підписано до випуску 20.11.2017

Адреса редакції і видавця

86123, ДНР, м. Макіївка, вул. Державіна, 2,
ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»
Телефони: (0622) 90-29-38; (0623) 22-20-51, (0623) 22-24-67
Тел/факс: (0623) 22-06-16, 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
ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»
86123, ДНР, м. Макіївка, вул. Державіна, 2

© ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури», 2017

УДК 541.135

А. И. СЕРДЮК, М. М. ЯЛАЛОВА

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

**ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ СВИНЦОВЫХ
АККУМУЛЯТОРОВ**

Аннотация. Изучен количественный состав выбросов фторидов и соединений свинца в зависимости от состава электролита для электрохимической переработки отработанных свинцово-кислотных автомобильных аккумуляторов. Выведена зависимость содержания фторидов и соединений свинца в выбросах от концентрации кремнефтористоводородной кислоты и ее свинцовой соли. Показано, что выбросы свинца составляют всего лишь 10 % от общих выбросов в атмосферный воздух, а наличие фторидов в выбросах на 89 % обусловлено содержанием кислоты в составе электролита. Установлено, что количество выбросов фторидов и соединений свинца с зеркала электролита не зависит от плотности приложенного тока.

Ключевые слова: выбросы загрязняющих веществ, свинцово-кислотные аккумуляторы, электрохимическая переработка, соединения свинца, фториды.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Отработанные свинцово-кислотные аккумуляторы относятся к категории высокотоксичных отходов и представляют значительную угрозу окружающей среде. В настоящее время наиболее перспективными по сравнению с пирометаллургическими методами являются технологии электрохимических процессов, основанные на химическом либо электрохимическом растворении свинецсодержащих компонентов аккумуляторов (пластин, шлама) [1]. Электрохимические процессы, лежащие в основе явления электролиза, неплохо сочетаются с другими операциями. При этом затрачивается меньшее количество энергии, образуется мало опасных отходов, органическая фракция в полном объеме выводится из процессов передела, в роли окислителя и восстановителя выступает электрический ток, и, поэтому исключается необходимость введения дополнительных реагентов, а также полностью отсутствуют выбросы диоксида серы. Кажущаяся дороговизна предлагаемого метода компенсируется снижением затрат на сборы за загрязнение окружающей среды свинцом и диоксидом серы. Но при этом происходит выделение вредных веществ с поверхности ванн в рабочей зоне, так как полностью герметизировать ванны невозможно. Это является препятствием с точки зрения распространения и использования этого метода.

На основе кремнефтористоводородной кислоты разработан состав электролита для переработки свинцово-кислотных автомобильных аккумуляторов [2]. Этот электролит устойчив в эксплуатации и легко поддается корректировке. Его изготовление проще и значительно дешевле, так как кремнефтористоводородная кислота получается на суперфосфатных заводах, как отход производства [3].

Фтористые газообразные соединения SiF_4 и HF , выделяющиеся при разложении кремнефтористоводородной кислоты, являются высокотоксичными соединениями, а их производные – сильными инсектицидами, которые негативно влияют на окружающую среду и здоровье человека, поэтому их выделение в атмосферу выше предельнодопустимых концентраций – недопустимо ($\text{ПДК}_{\text{р.з.}} = 0,1 \text{ мг/м}^3$ (по фтору) [4]).

Актуальность работы обусловлена тем, что изучение влияния состава электролита для переработки свинцово-кислотных аккумуляторов на выброс вредных веществ с поверхности ванн представляет несомненный интерес с точки зрения снижения нагрузки на окружающую среду при проведении данного процесса.

© А. И. Сердюк, М. М. Ялалова, 2017

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Установлено [5], что выбросы газообразных загрязняющих веществ с поверхности электролита не зависят от плотности тока при электролизе и переработке автомобильных аккумуляторов. В работе [6] показано, что электрохимическая технология переработки свинцово-кислотных аккумуляторов приводит к относительно небольшим выбросам вредных веществ (концентрация свинца и фторидов на границе санитарно защитной зоны предприятий не превышают предельно допустимых концентраций), однако из-за непрерывного контакта с технологическим оборудованием при переработке отработанных свинцово-кислотных аккумуляторов угроза наступления отдаленных последствий воздействия фторидов и свинца, накапливающегося в организме рабочих, сохраняется.

ЦЕЛЬ

Установить количественную закономерность выбросов фторидов и свинца, как основных вредных веществ при электрохимической переработке отработанных автомобильных свинцово-кислотных аккумуляторов, от состава электролита.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

В качестве электролита использовали водный раствор, состоящий из борной кислоты, свинцовой соли кремнефтористоводородной кислоты, свободной кремнефтористоводородной кислоты. Концентрация борной кислоты – 25 г/л. Химические вещества применялись марки «ч». В качестве поверхностно-активного вещества применяли желатин с концентрацией 0,5 г/л. Температура электролита – 25 °С. В качестве анода использовали специально обработанную ячейку отработанного аккумулятора [7]. Катодом служила свинцовая пластинка. Катодная плотность тока составляла 100 А/м².

Данные измерений удельного количества фторидов в зависимости от концентрации кремнефтористоводородной кислоты, выделяющихся с поверхности электролитов, представлены в таблице 1. Концентрация соли свинца постоянна и составляет 40 г/л.

Таблица 1 – Зависимость удельного количества фторидов ($V_{y\partial F}$), выделяющихся с поверхности электролитов, от концентрации кремнефтористоводородной кислоты ($C_{H_2SiF_6}$) в них

$C_{H_2SiF_6}$, г/л	0	25	35	45	60	90
$V_{y\partial F}$, мг/(с·м ²)	0	5,0	11	14	18	28

Графическая зависимость выбросов от состава электролита, рассчитанная по методу наименьших квадратов, приведена на рисунке 1.

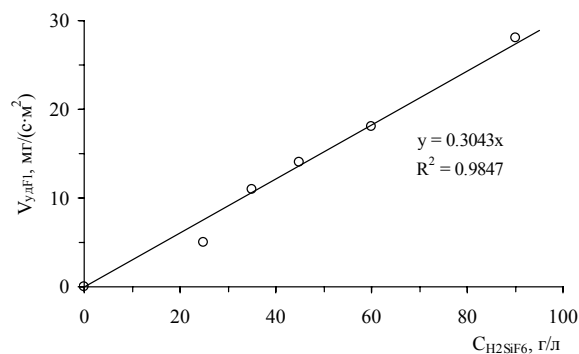


Рисунок 1 – Зависимость удельных выбросов фторидов ($V_{y\partial F}$) с поверхности электролита от концентрации кремнефтористоводородной кислоты ($C_{H_2SiF_6}$) в нем при постоянной концентрации соли свинца, равной 40 г/л.

Исходя из результатов, приведенных на рисунке 1, удельное количество фторидов (по фтору), выделяющееся с поверхности электролитов для свинцевания ($V_{y\partial F}$, мг/(с·м²)) будет составлять:

$$V_{y\partial F_1} = 0,31 \cdot C_F, \quad (1)$$

где C_F – концентрация кремнефтористоводородной кислоты в электролите, г/л.

Исследования также проводили при других постоянных концентрациях соли свинца, равных 74 и 105 г/л. Результаты, полученные при других концентрациях соли свинца, аналогичны предыдущим.

Эксперименты также проводили при плотности тока на катоде 0, 200 и 300 А/м². Показано, что выбросы фторидов и свинца не зависят от катодной плотности тока, определяющей скорость процесса выделения из раствора металлического свинца на катоде.

Измеряли количество выбросов фторидов с поверхности электролита при постоянной концентрации кремнефтористоводородной кислоты, равной 25 г/л, и переменной концентрации соли свинца (по свинцу) от 30 до 120 г/л по методике, описанной в работе [1]. Рассчитывали разницу выбросов фторидов ($V_{y\partial F_2}$) за счет соли свинца, с одной стороны, и кремнефтористоводородной кислоты с концентрацией равной 25 г/л, с другой.

Результаты измерения количества фторидов, выделяющихся с зеркала электролитов с разным содержанием соли свинца в них при одинаковой катодной плотности тока, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Удельное количество фторидов ($V_{y\partial F_2}$) и свинца ($V_{y\partial Pb}$), выделяющихся с поверхности электролитов, при разной концентрации соли свинца (по свинцу) (CP_b) в них

C_{Pb} , г/л	0	30	45	75	90	120
$V_{y\partial F_2}$, мг/(с·м ²)	0	0,21	0,30	0,55	0,65	0,85
$V_{y\partial Pb}$, мг/(с·м ²)	0	0,40	0,55	0,90	1,1	1,5

При других концентрациях кремнефтористоводородной кислоты, равных 70 и 110 г/л, получены аналогичные результаты вышеприведенным.

По методу наименьших квадратов рассчитали зависимость выбросов фторидов ($V_{y\partial F_2}$) и свинца ($V_{y\partial Pb}$) от концентрации соли свинца (CP_b) в электролите, которая представлена на рисунке 2.

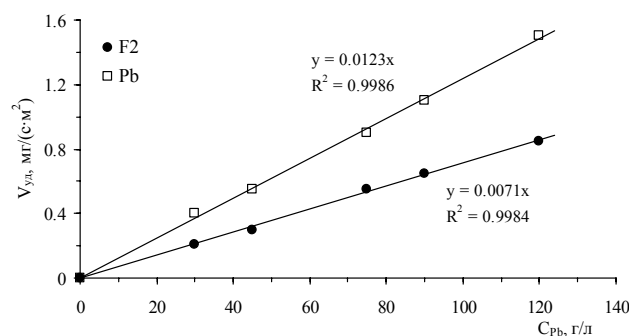


Рисунок 2 – Линейная зависимость выбросов фторидов ($V_{y\partial F_2}$) и свинца ($V_{y\partial Pb}$) от концентрации соли свинца (CP_b) в электролите (линейная аппроксимация выполнена по методу наименьших квадратов).

Исходя из результатов, приведенных на рисунке 2, имеем уравнение:

$$V_{y\partial F_2} = 0,007 \cdot C_{Pb}, \quad (2)$$

где CP_b – концентрация кремнефтористоводородного свинца (по свинцу) в электролите, г/л.

Следует отметить, что наиболее токсичными являются фториды и соли свинца, так как борная кислота в атмосфере имеет 4-й класс опасности (ПДК_{р.з.} = 10 мг/м³) и относится к малоопасным веществам. В материалах [8] катодный выход свинца по току составляет 99,8 %, это говорит о том, что разряд H^+ с выделением водорода имеет незначительное место.

Выбросы свинца, исходя из результатов, приведенных на рисунке 2, описываются уравнением:

$$V_{y\partial Pb} = 0,01 \cdot C_{Pb}, \quad (3)$$

где CP_b – концентрация кремнефтористоводородного свинца (по свинцу) в электролите, г/л.

Суммарные удельные выбросы фторидов с поверхности электролита ($\Sigma V_{y\partial F}$) рассчитываются с учетом уравнений (1) и (2) по формуле:

$$\Sigma V_{y\partial F} = V_{y\partial F1} + V_{y\partial F2} = 0,31 \cdot C_F + 0,007 \cdot C_{Pb}, \quad (4)$$

где C_F и CP_b – концентрации кремнефтористоводородной кислоты (по фтору) и кремнефтористоводородного свинца (по свинцу) соответственно, г/л.

Суммарные удельные выбросы фторидов и свинца с поверхности электролита (ΣV) рассчитываются по следующей формуле:

$$\Sigma V = V_{y\partial F1} + V_{y\partial F2} + V_{y\partial Pb} = 0,31 \cdot C_F + 0,007 \cdot C_{Pb} + 0,01 \cdot C_{Pb}, \quad (5)$$

Рассчитаем выбросы фторидов и свинца для электролита, состав которого аналогичен приведенному в патенте [2], а именно, г/л: свинец кремнефтористоводородный 80...120, кремнефтористоводородная кислота 20...30, борная кислота 4,0...6,0, желатина 0,5...1,0, остальное вода.

Рассчитанные выбросы фторидов и свинца для данного состава электролита по уравнениям (3–5) приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Удельные выбросы фторидов и свинца с зеркала электролита для переработки свинцово-кислотных аккумуляторов

№ п/п	Выбросы	Удельный выброс i -го компонента $V_{y\partial i}$, мг/(с·м ²)
1	Фториды	6,76–10,14
2	Свинец	0,8–1,2
Сумма токсичных выбросов		7,56–11,34

Выбросы фторидов с поверхности электролита на 89 % обусловлены содержанием кислоты в составе электролита. Выбросы свинца составляют всего лишь 10 % от общих выбросов в атмосферу.

ВЫВОДЫ

Выведена зависимость выбросов фторидов от концентрации кремнефтористоводородной кислоты и ее свинцовой соли и выбросов свинца от концентрации его соли. Варьируя концентрацией электролита данного состава можно добиться минимальных выбросов фторидов и свинца в атмосферу с сохранением или даже повышением скорости выделения свинца из раствора при переработке отработанных автомобильных свинцово-кислотных аккумуляторных батарей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Исаева-Парцвания, Н. В. Повышение экологической безопасности при электрохимической переработке свинцово-кислотных аккумуляторов в кремнефтористых электролитах [Текст] / Н. В. Исаева-Парцвания, А. И. Сердюк, А. Б. Ступин // Сборник научных трудов Донецкого национального университета. – Донецьк, 2005. – Вип. 57 : Державне управління. Механізми утворення природокористування. – С. 41–47.
- Пат. 7416. Украина, МКІ С25С1/18, С25D3/34, С25В1/00. Електроліт для вилучення свинцю з вторинної сировини на основі кремній фтористоводневої кислоти [Текст] / Н. М. Червонцева, Н. В. Исаева, А. І. Сердюк ; патентовласник Донбаська національна академія будівництва і архітектури. – № 20041210231 ; заявл. 13.12.04 ; опубл. 15.06.05, Бюл. № 6. – 8 с.
- Nanostructured Lead Compounds in Electrode Materials of a Lead-Acid Battery [Текст] / А. Р. Kuzmenko, Е. А. Grechushnikov, V. А. Kharseev [et al.] // Журнал нано- та електронної фізики. – Суми, 2016. – Т. 8, № 4, Ч. 1. – С. 40–46.
- Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны [Текст] : ГН 2.2.5.1313-03. – Введ. 15.06.03. – М. : Глав. госуд. сан. врач РФ, 2003. – 268 с.
- Исаева-Парцвания, Н. В. Выбросы вредных веществ при электрохимической переработке свинцово-кислотных аккумуляторов в электролитах на основе кремнефтористоводородной кислоты [Текст] / Н. В. Исаева-Парцвания, А. И. Сердюк, А. Б. Ступин // Вісник Донецького університету. – Донецьк, 2005. – Вип. 2, част. 2 : Природничі науки. – С. 327–331.
- Белоусова, В. В. К вопросу о разработке экологически безопасной технологии переработки активной массы отработанных свинцово-кислотных аккумуляторов [Текст] / В. В. Белоусова, Я. А. Деменкова, А. И. Сердюк //

- II Межд. науч.-практ. конференция «Стратегические вопросы мировой науки – 2007». Том 11 / под ред. С. В. Екимова. – Днепропетровск : Наука и образование, 2007. – С. 52–54.
7. Bard, A. J. Electrochemical methods. Fundamentals and applications [Текст] / A. J. Bard, L. R. Faulkner. – 2nd ed. – Wiley : John Wiley and sons, 2001. – 850 p. – ISBN 0-471-04372-9.
8. Characterization of nano-lead-doped active carbon and its application in lead-acid battery [Текст] / B. Hong, L. Jiang, H. Xue [et al.] // Journal Power Sources. – 2014. – Volume 270. – P. 332–341.

Получено 01.09.2017

О. І. СЕРДЮК, М. М. ЯЛАЛОВА
ПІДВИЩЕННЯ ТЕХНОГЕННОЇ БЕЗПЕКИ ПРИ ЕЛЕКТРОХІМІЧНІЙ
ПЕРЕРОБЦІ СВИНЦЕВИХ АКУМУЛЯТОРІВ
ДОНБУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

Анотація. Вивчено кількісний склад викидів фторидів і сполук свинцю залежно від складу електроліту для електрохімічної переробки відпрацьованих свинцево-кислотних автомобільних акумуляторів. Виведена залежність вмісту фторидів і сполук свинцю у викидах від концентрації кремнефтористоводневої кислоти і її свинцевої солі. Показано, що викиди свинцю складають всього лише 10 % від загальних викидів у атмосферне повітря, а наявність фторидів у викидах на 89 % обумовлена вмістом кислоти в складі електроліту. Встановлено, що кількість викидів фторидів і сполук свинцю зі дзеркала електроліту не залежить від щільності прикладеного струму.

Ключові слова: викиди забруднювальних речовин, свинцево-кислотні акумулятори, електрохімічна переробка, сполуки свинцю, фториди.

ALEXANDER SERDYUK, MARGARITA YALALOVA
INCREASE OF TECHNOGENIC SAFETY IN ELECTROCHEMICAL
PROCESSING OF LEAD-ACID BATTERIES
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The quantitative composition of fluoride and lead compounds emissions depending on the composition of the electrolyte for electrochemical processing of lead-acid car batteries was studied. The dependence of the content of lead fluorides and compounds in the emissions on the concentration of fluorosilicic acid and its lead salt has developed. It has been shown that lead emissions make up only 10 % of total emissions to atmospheric air, and the presence of fluorides in emissions by 89 % is due to the acid content of the electrolyte. It has been established that the amount of fluoride and lead compounds emissions from the electrolyte mirror does not depend on the density of the applied current.

Key words: emissions of pollutants, lead-acid batteries, electrochemical processing, lead compounds, fluorides.

Сердюк Александр Иванович – доктор химических наук, профессор кафедры техносферной безопасности ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: разработка физико-химических основ переработки промышленных отходов.

Ялалова Маргарита Маратовна – ассистент кафедры техносферной безопасности ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: переработка и утилизация промышленных отходов.

Сердюк Олександр Іванович – доктор хімічних наук, професор кафедри техносферної безпеки ДОН ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: розробка фізико-хімічних основ переробки промислових відходів.

Ялалова Маргарита Маратовна – асистент кафедри техносферної безпеки ДОН ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: переробка та утилізація промислових відходів.

Serdyuk Alexander – D. Sc. (Chem. Sc.), Professor, Technosphere Safety Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: development of physico-chemical basis for processing industrial waste.

Yalalova Margarita – Assistant, Technosphere Safety Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: processing and recycling of industrial wastes.

УДК 628.511

С. М. ОРЛОВ, Б. Р. РОМАНЕНКО, А. Я. ОРЛОВА

ГООУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ПЫЛИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИКЛОНОВ

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос электризации строительной пыли, находящейся в достаточно сильном вихревом потоке. Рассматривая такие явления, как торнадо, грозовые тучи, приходим к выводу, что в торнадо происходит сильнейшая электризация пыли, которая сопровождается мощными разрядами молний, особенно в основании хобота торнадо, где присутствует большое количество наэлектризованной пыли. При прохождении хобота торнадо могут загораться лампочки накаливания, что подтверждает теорию присутствия сильных электромагнитных процессов в вихревом потоке наэлектризованной пыли. Установлено, что электрический потенциал строительной пыли в циклоне может достигать единиц и даже десятков кВ. Таким образом, энергия, затраченная на создание в циклоне интенсивного вихревого потока, используется не полностью (используется только центробежная сила, создаваемая вихревым потоком). Сопутствующее явление, как электризация строительной пыли, не используется. Сделан вывод, что использование этого явления, может значительно повысить энергоэффективность циклонной очистки.

Ключевые слова: циклон, торнадо, статическое электричество, электромагнитное поле.

Защита атмосферы – социальная и экономическая проблема, неразрывно связанная с задачей создания комфортных условий для жизни и работы человека.

Большинство технологических процессов в промышленности строительных материалов сопровождается пылегазовыми выбросами, содержащими ценные полупродукты, которые безвозвратно теряются. Поэтому очистка и обезвреживание промышленных выбросов имеют санитарное и экономическое значение.

Циклоны являются наиболее характерными представителями сухих инерционных пылеуловителей, которые, как правило, имеют простую конструкцию, обладают большой пропускной способностью и несложны в эксплуатации. Ввиду этих преимуществ циклоны получили широкое распространение [1–4].

В циклонах наиболее совершенных конструкций можно достаточно полно улавливать частицы размером от 10 мкм и более, однако наблюдается проскок достаточно крупных частиц, поэтому зачастую циклоны используются в качестве первой ступени очистки перед аппаратами тонкого пылеулавливания.

В настоящее время имеется большое количество исследований по повышению эффективности циклонов, а также создано значительное количество видов циклонов, однако добиться, чтобы циклоны использовались, как самостоятельный аппарат очистки газа от пыли не удалось, поэтому циклоны, как правило, используются для предварительной очистки газа от пыли.

Для повышения эффективности циклонов ведутся работы по совмещению нескольких видов пылеулавливания в комбинированном аппарате.

Известно множество конструкций аппарата, представляющего комбинацию рукавного фильтра с трубчатым электрофильтром. Такое сочетание позволяет повысить скорость фильтрации и снизить гидравлическое сопротивление аппарата и др.

Известны также комбинированные аппараты, называемые центробежными электрофильтрами или электроциклонами. В общем корпусе размещен центробежный пылеуловитель – циклон и электрофильтр.

Различают два вида электроциклонов по месту расположения электрической части. В некоторых конструкциях коронирующие электроды размещены в цилиндрической части циклона, а в аппаратах второго типа коронирующие электроды размещены в выхлопной трубе.

Анализ работ, посвященных центробежным электрофильтрам, позволяет сделать вывод о том, что более предпочтительными являются электрофильтры второго типа [5].

В работе [6] получена формула радиальной скорости частицы при совместном действии центробежных и кулоновских сил для наиболее неблагоприятного момента вхождения частицы пыли равного $0,3R_2$:

$$\omega_p = \frac{id}{3\pi\mu K} \left[1 - \left(\frac{R_1}{0,3R_2} \right)^2 \right] + \frac{2\varepsilon_0 d}{3\mu} \left(E \frac{R_1}{0,3R_2} \right)^2 + \frac{d^2 \rho \omega^2 0,3R_2}{18\mu}, \quad (1)$$

где R_2 – внутренний радиус выхлопной трубы циклона.

Анализ формулы (1) [6] показывает, что при малом радиусе нахождения частицы в межэлектродном пространстве преобладает кулоновская сила, а по мере увеличения радиуса возрастает влияние центробежной силы. Это очень важно, поскольку в центре вихря полностью отсутствует центробежная сила, а разрежение максимальное, поэтому в циклонах наблюдается проскок даже очень крупных частиц пыли, попавших в центр вихря. Также роль кулоновской силы возрастает с уменьшением диаметра частицы. Так для частиц пыли менее 1 мкм кулоновская сила преобладает практически во всем межэлектродном пространстве.

Но, несмотря на существенные преимущества электроциклонов по сравнению с циклонами, электроциклоны широкого распространения не получили. Это объясняется значительным увеличением затрат на обслуживание и увеличение затрат энергоресурсов на создание электрического поля, что при росте цен на энергоресурсы в настоящее время недопустимо.

Настоящая работа посвящена поиску новых направлений повышения эффективности циклонов за счет более полного использования энергии закрученного потока. В настоящее время энергия, затраченная на закрутку газового потока, используется только в виде центробежных сил, действующих на частицу пыли в вихревом газовом потоке. Однако частицы пыли, попадая в циклоне в мощный вихревой поток и взаимодействуя с молекулами газа и стенок циклона, получают достаточно сильный статический заряд.

Основные причины появления статического электричества:

- контакт между двумя материалами и их отделение друг от друга (включая трение, намотку, размотку и пр.);
- быстрый температурный перепад (например, в момент помещения материала в нагревательный шкаф, такое природное явление как извержение вулканов, где происходят мощные грозовые разряды);
- радиация с высокими значениями энергии, ультрафиолетовое излучение, рентгеновские X-лучи, сильные электрические поля;
- резательные операции (например, на раскроечных станках или бумагорезальных машинах);
- поверхностный контакт и разделение материалов, возможно, являются наиболее распространенными причинами возникновения статического электричества.

Электризация пыли в основном происходит при размоле твердых веществ, транспортировании их по пылепроводам. При движении пыли с воздухом пылинки способны электризоваться. Так, заряды зерна в дробилках достигают 10–11 кВ, а на вальцах – 5–7 кВ. Знак заряда, приобретаемый пылью, зависит от диэлектрической постоянной пыли и того тела, от которого происходит трение. Величина заряда статического электричества зависит от скорости движения пыли (силы трения), степени дисперсности пыли, величины удельного электрического сопротивления и от влажности пыли и воздуха. Чем больше скорость движения пыли и больше степень дисперсности, тем больше величина заряда статического электричества. Например, потенциал заряда пыли каменного угля дисперсностью 200 мкм при скорости движения пылевоздушной смеси 2,25 м/с составляет 6 кВ. При увеличении скорости движения до 3,5 м/с потенциал заряда возрастает до 7,5 кВ. В циклоне скорость может достигать до 20 м/с и более, поэтому степень электризации пыли в циклоне достигает значительных величин, вплоть до 102 кВ.

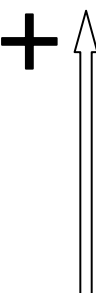

При транспортировании пыли по трубопроводу потенциал зарядов изменяется по его сечению. Наиболее низкий потенциал наблюдается вблизи стенок заземленного трубопровода, а наиболее

высокий – на расстоянии 2 см от стенок. По величине удельного электрического сопротивления можно судить об опасности электризации пыли. При удельном электрическом сопротивлении меньше 104 Ом·см пыль практически не опасна в отношении электризации.

Пыль, получаемая при производстве строительных материалов, относится ко второй группе по величине удельного электрического сопротивления от 104 до $2 \cdot 10^{10}$ Ом·см, которая хорошо электризуется.

Для того, чтобы ориентировочно узнать насколько будет электризоваться пыль, полученная при производстве строительных материалов, существует трибоэлектрическая шкала (табл.).

Таблица – Трибоэлектрическая шкала

	Атмосфера
	Кожа руки
	Кроличий мех
	Стекло
	Плексиглас
	Слюда
	Волосы
	Нейлон
	Овечий мех
	Свинец
	Шелк
	Алюминий
	Бумага
	Хлопок
Нейтральный ряд	Сталь
	Дерево
	Янтарь
	Эбонит
	Никель, медь
	Цинк
	Латунь, серебро
	Золото, платина
	Сера
	Ацетатный шелк
	Полиэфир
	Целлулоид
	Полиуретан
	Полистирол
	Полиэтилен
	Полипропилен
	Поливинилхлорид
	Полиэтилентетрафталат, лавсан
	Кремний
	Политетрафторэтилен (тефлон), фторопласт
	Эбонит

Чем выше располагается материал на шкале, тем сильнее он заряжается. В верхней части шкалы располагаются материалы с положительными зарядами, а в нижней – с отрицательными.

Действует и другая закономерность, чем больше разнесены между собой материалы, тем более мощным станет заряд. Так в верхней части шкалы располагается атмосфера и руки человека, а в нижней кремний, эбонит, т. е. максимально мощный заряд возникнет при контакте атмосферы и кремния. По электрическим характеристикам кремний наиболее близко стоит с материалами, применяемыми в строительстве. Таким образом, при взаимодействии пыли и атмосферы пыль строительных материалов получает мощный электрический заряд, который тем выше, чем выше скорость вихревого потока в циклоне.

Для примера рассмотрим обыкновенные грозовые облака. Эти природные электрические машины, как оказалось, способны накапливать потенциалы в миллиарды вольт, а общая мощность средней грозы вполне сравнима с взрывом нескольких термоядерных бомб. И все это – результат всего

лишь взаимодействия капелек и льдинок, которые держатся в воздухе на восходящих потоках. Часто грозовые облака сопровождаются торнадо. При прохождении торнадо зажигаются выключенные лампочки накаливания, что свидетельствует о наличии в нем сильного переменного магнитного поля, которое создают заряженные частицы пыли, находясь в вихревом потоке торнадо, особенно в основании торнадо. В основании торнадо наблюдаются также мощные разряды молний, которые объясняются тем же явлением.

Гидравлические процессы в циклоне и торнадо очень схожи [7]. Различие только в масштабах. Электрические процессы в торнадо также аналогичны электрическим процессам в циклонах. Различие состоит, как и в первом случае, в масштабах процесса и ограничением заряженных частиц пыли в вихревом потоке заземленными металлическими стенками циклона и отсутствием сильно электризованного материнского облака, поэтому электрические процессы в циклоне необходимо рассматривать как движение заряженных частиц в вихре.

В настоящее время отсутствует, какая-либо теория электромагнитного состояния пылевого коктейля внутри циклона. Имеется электромагнитная теория торнадо (смерча) [8–9]. При расчете магнитных полей учитывались не только токи проводимости, но и конвективный ток вращающихся капель. Это связано с отсутствием азимутального тока проводимости вследствие цилиндрической симметрии плазменного столба.

Уравнения для магнитных полей имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r B_r) + \frac{dB_z}{dz} &= 0; \\ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dB_r}{dr} \right) - \frac{B_r}{r^2} + \frac{d^2 B_z}{dz^2} &= \frac{4\pi j_\varphi}{cdz}, \\ j_r &= \sigma E_r, \quad j_z = \sigma E_z, \\ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dB_\varphi}{dr} \right) - \frac{B_\varphi}{r^2} + \frac{d^2 B_\varphi}{dz^2} &= \frac{4\pi}{c} \left(\frac{dj_z}{dr} - \frac{dj_r}{dz} \right); \\ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dB_\varphi}{dr} \right) + \frac{d^2 B_z}{dz^2} &= \frac{4\pi}{c} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r j_\varphi). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь ρ_e и V_φ – объемная плотность и скорость вращения капель. Численное исследование показало, что для значений $h/a \geq 0,5$ радиальные градиенты токов существенно превышают осевые, что позволило упростить решение задачи. В итоге для магнитных полей получены следующие выражения: $B_r = 0$,

$$B_z(r, z) = \begin{cases} \frac{4\pi}{c} \int_{R_i}^{\infty} \rho_d V_\varphi dr, & 0 \leq r \leq R_T \\ \frac{4\pi}{c} \int_r^{\infty} \rho_d V_\varphi dr, & R_r \leq r \leq \infty \end{cases} \quad 0 \leq z \leq h, \quad (3)$$

где R_T – внутренняя граница капельной стенки. Это есть магнитное поле соленоида, образованного вращающимися заряженными каплями (капельный соленоид). Азимутальная компонента магнитного поля определяется следующей формулой:

$$B_z(r, z) = -\frac{4\pi}{cr} \begin{cases} \int_0^r x dx \int_x^{R_E} \left(\frac{dj_z}{dt} - \frac{dj_r}{dz} \right) dt, & 0 \leq r \leq R_E \\ \int_0^{R_E} x dx \int_x^{R_E} \left(\frac{dj_z}{dt} - \frac{dj_r}{dz} \right) dt, & R_E \leq r \leq \infty \end{cases}, \quad (4)$$

где R_E – граница разряда. Компоненты силы Лоренца, действующей на плазму, находились по формулам

$$F_r = -\frac{1}{c} j_z B_\varphi, \quad F_z = \frac{1}{c} j_r B_\varphi, \quad F_\varphi = -\frac{1}{c} j_r (B_0 + B_z), \quad (5)$$

где B_0 – вертикальная компонента геомагнитного поля.

В выражении для азимутальной (вращающей) силы учитывалось и магнитное поле капельного соленоида. По этим формулам проводился анализ радиальных и осевых зависимостей азимутального магнитного поля и сил в плазме вихря под облачными зарядами на различных относительных высотах (рис. 1–4).

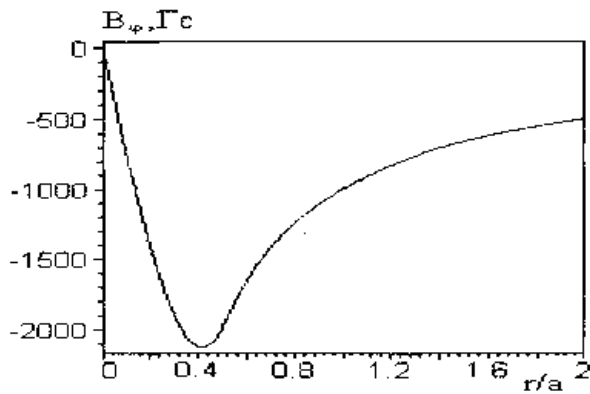


Рисунок 1 – Азимутальное магнитное поле на поверхности земли ($h/a = 0,5$; $Q = -64,2$ Кл; $a = 1$ км).

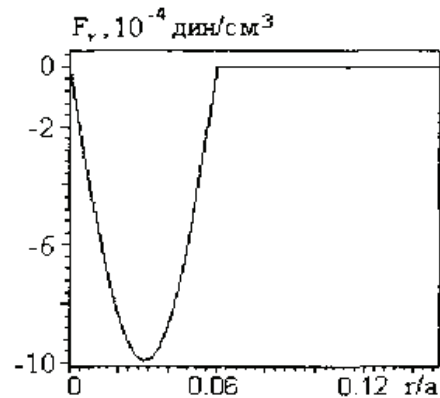


Рисунок 2 – Плотность радиальной силы в нижнем основании вихря ($h/a = 1,3$; $Q = -103,3$ Кл; $a = 1$ км).

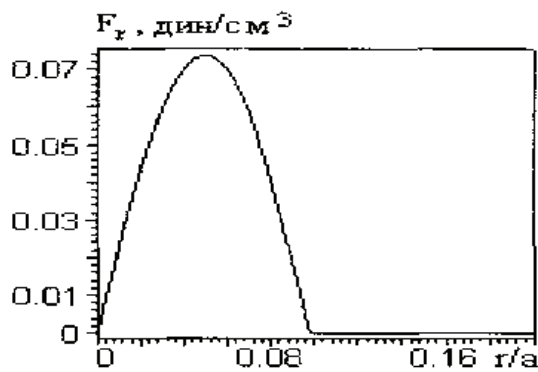


Рисунок 3 – Плотность радиальной силы в нижнем основании вихря ($h/a = 0,5$; $Q = -63,3$ Кл; $a = 1$ км).

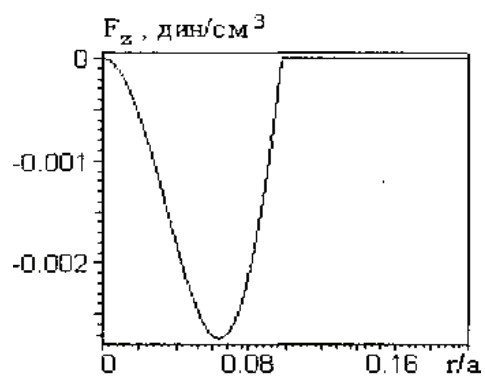


Рисунок 4 – Плотность осевой силы в нижнем основании вихря ($h/a = 0,5$; $Q = -63,3$ Кл; $a = 1$ км).

Видно, что радиальная сила здесь отрицательна, т.е. она сжимает плазму, как в z-пинче. Это говорит о том, что в генерации азимутального магнитного поля основную роль играет осевой ток. С уменьшением относительной высоты заряда становится существенной неоднородность радиального тока по высоте. Радиальная сила при этом может изменить свой знак и приводить не к сжатию плазмы, а к разрежению в ней (рис. 3).

Осевая сила направлена от облака к земле. Непосредственно под зарядом она многократно усилена и приводит к образованию воронки вихря.

Полученная теория [8–9] мало пригодна для описания электромагнитных процессов в циклоне. Помимо масштабов процесса, вихрь в циклоне ограничен металлическими стенками, отсутствует материнское облако с большим статическим зарядом, однако как методика вполне может пригодиться. В конечном итоге нам нужно установить уровень статического заряда по сечению циклона, направление и напряженность электромагнитного поля, создаваемого заряженными частицами пыли в циклоне. Используя выше перечисленные явления, необходимо изыскать способ повышения энергоэффективности циклона без применения дополнительных источников энергии.

ВЫВОДЫ

1. Сделано предположение, что пыль в циклоне, попадая в сильный вихревой поток подвержена электризации.

2. Наэлектризованная пыль, находящаяся в вихревом потоке, создает электромагнитное поле, которое при рациональном использовании может значительно снизить энергозатраты на очистку газов от пыли в циклонах.

3. Установлено, что работа по изучению электростатических и электромагнитных процессов, протекающих в циклоне, имеет большой практический интерес, так как позволит более полно использовать энергию, затраченную на закрутку газового потока, а, следовательно, повысить энергоэффективность циклонной очистки газов от пыли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пылеулавливание в металлургии [Текст] / Под ред. А. А. Гурвица. – М. : Металлургия, 1984. – 336 с.
2. Луговский, С. И. Совершенствование систем промышленной вентиляции [Текст] / С. И. Луговский, Г. К. Дымчук. – М. : Стройиздат, 1991. – 136 с.
3. Русанов, А. А. Справочник по пыле- и золоулавливанию [Текст] / Под ред. А. А. Русанова. – М. : Энергия, 1975. – 296 с.
4. Алиев, Г. М. Устройство и обслуживание газоочистных и пылеулавливающих установок [Текст] / Г. М. Алиев. – М. : Металлургия, 1988. – 368 с.
5. Куцев, Л. А. Интенсификация процессов улавливания твердой и жидкой фазы аэрозолей при использовании силовых полей [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Л. А. Куцев. – Белгород, 2004. – 41 с.
6. Орлов, С. М. Исследование усовершенствованного циклона как первой ступени очистки газа от пыли [Текст] / С. М. Орлов, Э. И. Дмитроченкова // Вісті автомобільно-дорожнього інституту. – Горлівка, 2011. – № 1. – С. 188–195.
7. Орлов, С. М. Исследование целесообразности применения циклонов «правого» и «левого» направления вращения в северном полушарии Земли [Текст] / С. М. Орлов, А. Я. Орлова // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2014. – Выпуск 2014-5(190). – С. 29–35.
8. Боев, А. Г. Электромагнитная теория смерча [Текст]. I ч. Электродинамика вихря / А. Г. Боев // Радиофизика и радиоастрономия. – 2009. – Т. 14, № 2. – С. 121–149.
9. Боев, А. Г. Плазменная теория смерча [Текст] / А. Г. Боев // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения». – 2008. – № 6. – С. 133–138.

Получено 02.09.2017

С. М. ОРЛОВ, Б. Р. РОМАНЕНКО, А. Я. ОРЛОВА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРИЗАЦІЇ ПИЛУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЦИКЛОНІВ ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

Анотація. У статті розглянуто питання електризації будівельного пилу, що знаходиться у досить сильному вихровому потоці. Розглядаючи такі явища, як торнадо, грозові хмари, приходимо до висновку, що в торнадо відбувається найсильніша електризація пилу, яка супроводжується потужними розрядами блискавок, особливо в основі хобота торнадо, де присутня велика кількість наелектризованого пилу. При проходженні хобота торнадо можуть засвічуватися лампочки розжарювання, що підтверджує теорію присутності сильних електромагнітних процесів у вихровому потоці наелектризованого пилу. Встановлено, що електричний потенціал будівельного пилу в циклоні може досягати одиниць і навіть десятків кВ. Таким чином, енергія, витрачена на створення в циклоні інтенсивного вихрового потоку, використовується не повністю (використовується тільки відцентрова сила, створювана вихровим потоком). Супутнє явище, як електризація будівельного пилу, не використовується. Зроблено висновок, що використання цього явища, може значно підвищити енергоефективність циклонічного очищення.

Ключові слова: циклон, торнадо, статична електрика, електромагнітне поле.

STANISLAV ORLOV, BORIS ROMANENKO, ALLA ORLOVA
PROSPECTS FOR THE USE OF ELECTRIFICATION OF DUST TO INCREASE
THE EFFICIENCY OF THE CYCLONES

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. In the article the question of electrification of construction dust, which is in a sufficiently strong vortex flow has been considered. Considering such phenomena as tornadoes, storm clouds, we come to the conclusion that a tornado occurs the strongest electrification of dust, which is accompanied by a powerful lightning discharge, especially at the base of the trunk of the tornado, where there is a large number of electrified dust. When passing the trunk of the tornado, light bulb filament can light up that supports the theory of the presence of strong electromagnetic processes in the vortex flow of electrified dust. It is established that the electric potential of construction dust in the cyclone can reach units and even tens of kV. Thus, the energy expended on the creation of the cyclone is an intense vortex flow, is not fully used (only used the centrifugal force created by the vortex flow). A concomitant phenomenon of electrification construction dust, is unused. It is concluded that the use of this phenomenon, can greatly increase the energy efficiency of a cyclone cleaning.

Key words: cyclone, tornadoes, static electricity, electromagnetic field.

Орлов Станислав Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и электроснабжения в строительстве ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: автоматизация процессов и аппаратов систем ТГВ.

Романенко Борис Романович – магистрант кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергоресурсосбережение в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха.

Орлова Алла Яковлевна – старший преподаватель кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: вентиляция и кондиционирование помещений жилых и общественных зданий.

Орлов Станіслав Михайлович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та електропостачання в будівництві ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: автоматизація процесів і апаратів систем ТГВ.

Романенко Борис Романович – магістрант кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергоресурсозбереження в системах опалення, вентиляції та кондиціювання повітря.

Орлова Алла Яківна – старший викладач кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: вентиляція і кондиціювання приміщень житлових і громадських будівель.

Orlov Stanislav – Ph. D. (Eng), Associate Professor, Electrical Technology and Automatics in Engineering Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: automation of processes and apparatus of DVT systems.

Romanenko Boris – master's student, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: energy and resource saving in heating, ventilation and air conditioning systems.

Orlova Alla – senior teacher, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: ventilation and air conditioning of residential and public buildings.

УДК 622.51 : 628.33

С. П. ВЫСОЦКИЙ ^а, С. Е. ГУЛЬКО ^бГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», ^б Донгипрошахт**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ЗАКРЫТИИ
УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

Аннотация. Технические риски при эксплуатации и закрытии угольных шахт оказывают неблагоприятное воздействие на окружающую среду, что обуславливает: загрязнение атмосферы парниковым газом-метаном и продуктами горения породных отвалов, загрязнение поверхностных и подземных водных источников высокоминерализованными шахтными водами, опасность разрушения зданий, сооружения и коммуникаций при их размещении над территориями подрабатываемых шахтных полей. Обосновано использование методов дегазации угольных пластов и применение микробиологической деструкции метана с использованием бактерий. Для снижения неблагоприятного воздействия терриконов обосновано сооружение плоских отвалов и использование «глиняных» экранов. Приведена характеристика влияния подработок на состояние земной поверхности, которые вызывают опасности разрушения зданий, сооружений и подземных коммуникаций.

Ключевые слова: угольные шахты, воздействие, метан, дегазация, терриконы, подработка.

Мы живём во время, когда основная часть угольных месторождений уже открыта. Мировые запасы всех видов углей оцениваются в 8 620 млрд тонн. При этом извлекаемыми считаются запасы каменного угля в пластах мощностью 0,3 м, залегающих на глубине не более 2 000 м. Угли, не соответствующие этим требованиям, относятся к потенциальным запасам. Запасы угля на Земле расположены весьма неравномерно. Однако странам СНГ повезло, примерно 6 000 млрд тонн – это запасы угля на территории бывшего СССР. На втором месте по запасам, примерно 4 150 млрд тонн – Северная Америка, а на третьем с 1 600 млрд тонн – Азия (без стран СНГ).

По уровню жизни для населения, обеспечивающего примерно 30 % всех твердотопливных энергоносителей и почти 60 % всех видов энергоносителей в мире, нельзя утверждать, что нам очень повезло. А если сюда добавить ещё и экологическую составляющую, то оказывается, что население таких регионов, к которым относится и Донбасс, оказалось в неблагоприятной ситуации.

Эксплуатация шахт оказывает целый ряд неблагоприятных воздействий на окружающую среду. Причём неблагоприятное воздействие не прекращается даже после закрытия шахт. Прослеживается подобная ситуация и с другими энергетическими монстрами АЭС. Их неблагоприятное воздействие на окружающую среду продолжается и после вывода их из эксплуатации. В связи с необходимостью финансирования природоохранных мероприятий, объем которого бывает столь значителен, что это сказывается на экономике целых стран. Требуется оценка неблагоприятных воздействий при эксплуатации и закрытии шахт и обоснование применения мероприятий по их минимизации.

Целью настоящей работы является по возможности полная оценка неблагоприятного воздействия шахт на окружающую среду и методов устранения или минимизации указанных воздействий.

Неблагоприятное воздействие шахт на окружающую среду включает:

- загрязнение атмосферы парниковым газом – метаном, который в 21 раз интенсивнее действия диоксида углерода, при расчете на единицу массы компонента;
- загрязнение атмосферы соединениями серы: сероводородом и диоксидом серы в результате горения породных отвалов;
- загрязнение атмосферы пылью в результате уноса высокодисперсных частиц пыли из терриконов;

- загрязнение поверхностных водных источников высокоминерализованными шахтными водами;
- отчуждение больших территорий под золоотвалы;
- загрязнение подземных вод в результате выщелачивания токсичных компонентов (в основном соединений тяжелых металлов) под воздействием осадков;
- разрушение зданий, сооружений и подземных коммуникаций при их размещении над территориями подрабатываемых шахтных полей.

Некоторые из приведенных факторов относятся к событиям непреодолимой силы и в настоящее время их действие не может быть исключено. Так, по первому фактору, несмотря на то, что существуют теоретические и лабораторные проработки по мембранным методам концентрирования таких газов, как метан, практическая реализация технологии не может быть осуществлена вследствие относительно низких удельных потоков газов через мембраны и высоких удельных затрат электроэнергии на компримирование вентиляционных выбросов. Существуют направления использования шахтного метана, реализация которых уже начата [1].

Шахтный метан является малоиспользуемым энергетическим ресурсом. Вместе с тем, он является попутным полезным ископаемым, извлечение которого диктуется не только необходимостью обеспечения газобезопасности ведения горных работ, но и его востребованностью и рентабельностью как самостоятельного топлива, добыча которого может осуществляться независимо от разработки угля. Рентабельность газодобычи достигается использованием эффективной углегазопромысловой технологии с учетом сокращения атмосферных выбросов метана, которая уже более 10 лет успешно применяется в США, Канаде и Китае, а в последние годы в России, Германии, Австралии и других странах [2–3].

Шахтный метан достаточно полно используется индустриально развитыми странами как вспомогательный источник энергии для электроэнергетики и в качестве топлива для автотранспорта угледобывающих регионов. Особое внимание уделяется разработкам новых технологий извлечения метана из угольных пластов, позволяющих разрабатывать месторождения в качестве газоугольных и отвечающих требованиям ресурсосбережения и экологической безопасности [4]. Опыт дегазации шахт, извлечения метана из неразгруженных угольных пластов, подрабатываемой углевымещающей толщи и выработанного пространства отработанных участков закрытых шахт говорит о тесной взаимосвязи геологических, геомеханических и технологических аспектов функционирования предприятий по совместной добыче угля и метана [5].

Проведенные на АП «Шахта им. А. Ф. Засядько» работы по применению дегазации на пласте l_1 подтвердили его эффективность для интенсификации дегазации отработываемых угольных пластов. На всех обработанных участках была достигнута заданная эффективность дегазации 30 %. Кроме того, при некоторых режимах воздействия был достигнут коэффициент дегазации 0,68. Сравнение применяемых для оценки интенсивности дегазации показателей среднего удельного газовыделения из скважин, через которые было произведено воздействие ($v_g/l_{ска} = 603 \text{ м}^3/\text{м}$), с контрольным ($203 \text{ м}^3/\text{м}$) показывает увеличение средней интенсивности газовыделения в 2,6 раза.

При использовании пневмогидродинамической дегазации при создании перепада давления величиной 2,6–7,0 МПа при сбросе в скважине происходит интенсивная промывка закольматированного горного массива и изменения в напряженно-деформированном состоянии прискважинной зоны, приводящие к увеличению проницаемости массива и повышению выхода метана в скважину [6].

Следующим направлением снижения эмиссии метана является применение микробиологического окисления метана с использованием бактерий. На шахте «Ясиновская-Глубокая» объединения «Советскуголь» было подвержено обработке 60 м² площади выработанного пространства. В зоне микробиологического воздействия на сопряжении лавы с вентиляционным штреком в результате биохимической реакции местные скопления метана были снижены на 58 %. Совместно с Институтом микробиологии и вирусологии НАН Украины, Институтом биохимии и физиологии микроорганизмов РАН и ВНИИСинтезбелок способ был применен для дегазации выработанных пространств двух лав шахты «Ясиновская-Глубокая» и семи лав шахты «Западно-Донбасская» ГХК «Павлоградуголь», где была использована биомасса метаноокисляющих бактерий Нарткалинского химкомбината. Площадь микробиологической обработки была доведена до 4 600 м².

Подготовленная суспензия насосом по трубопроводу подавалась в призабойное пространство лавы и оросительными форсунками, установленными на секциях крепи, или с помощью разбрызгивающей насадки наносилась на обрушаемые породы. При этом на участке выработанного пространства лавы длиной 25...30 м формировался микробиологический фильтр, проходя через который метан

выработанного пространства окислялся бактериями. В результате обработки в лаве длиной 150 м при способе управления кровлей полным обрушением и исходном газовыделении из выработанного пространства 70 % в течение 22 суток обработки был создан биологический фильтр размером по простиранию 25 м, что привело к существенным изменениям структуры газового баланса добычного участка. В период воздействия относительная газообильность участка снизилась с 8,75 до 6,61 м³/т, а средняя концентрация метана в исходящей струе воздуха – с 0,9...1,0 % до 0,66 %. При этом среднесуточная нагрузка на лаву повысилась с 768 до 922 т. Таким образом, даже при возросшей на 20 % суточной нагрузке на лаву, средняя концентрация метана в исходящей струе участка была меньше, чем до применения бактерий, что обеспечило возможность дальнейшего увеличения нагрузки на очистной забой до 1 200 т/сут.

Технология дегазации тупиков погашаемых штреков состоит в периодическом нанесении суспензии на породы, обрушаемые при их погашении. Применение микробиологического воздействия обеспечило снижение газообильности выработанных пространств участков на 36...57 % и концентрации метана в зонах его скопления в 10–19 раз.

Применение интенсификации предварительной дегазации через поверхностные дегазационные скважины с применением пневмогидродинамического воздействия, интенсификации дегазации через дегазационные скважины, пробуренные из подготовительных выработок при подготовке и отработке выемочных участков с помощью гидродинамического воздействия и снижения газовыделения из выработанного пространства и тупиков погашаемых штреков микробиологическим воздействием, позволяет не только повысить безопасность ведения горных работ, но и существенно увеличить количество используемого метана угольных месторождений (за счет повышения концентрации метано-воздушной струи) и снизить его выбросы в атмосферу.

Одним из существенных источников загрязнения окружающей среды является поступление загрязнения из огромного количества породных отвалов – терриконов. Их отрицательное действие проявляется в загрязнении атмосферы пылью и соединениями серы и гидросферы – соединениями тяжелых металлов.

Самовозгорание происходит на 60...75 % конических и 20...35 % плоских отвалов. С поверхности отвалов в атмосферу ежегодно поступает более 500 тыс. т газообразных загрязнителей. Суточная эмиссия загрязнений с отвалов шахт и обогатительных фабрик Донбасса составляет около 10 т оксида углерода, 155 т диоксида углерода, 1,5 т диоксида серы, 340 кг сероводорода и 75 т оксидов азота.

Для предотвращения пыления породных отвалов наиболее эффективным методом является их озеленение [7]. Такой метод применим к «старым отвалам». Для отвалов, находящихся в эксплуатации и относительно «молодых», возможно использование химического связывания пылящей породы. Например, с использованием полимерных растворов ММ-1 (гидролизированный априлонитрил), технических лигносульфатов, спиртовой барды, нефтяных шламов, а также латекса. Как известно, такое решение было использовано в 30-и километровой зоне после аварии на Чернобыльской АЭС. Возможно также использование измельченного известняка, который при реакции с образующейся в терриконах серной кислотой создает защитную пленку гипса [8]. Учитывая относительно высокую стоимость такого решения с точки зрения затрат на его выполнение, очевидно, что такой метод целесообразно осуществлять для терриконов, находящихся в городской черте мегаполисов. Для распыления растворов могут быть использованы дроны.

Химическими источниками загрязнений атмосферы и гидросферы являются сульфиды различных металлов (пирит, марказит, пиротин, халькопирит и др.), которые в значительных количествах содержатся в породных отвалах. Сульфиды металлов в присутствии влаги и кислорода окисляются с образованием сернистой и серной кислот. При взаимодействии этих кислот с неокисленными сульфидами образуется токсичное соединение – сероводород, загрязняющий атмосферный воздух, и происходит выщелачивание соединений тяжелых металлов, загрязняющих подземные и поверхностные воды.

Кроме указанных загрязнителей, отвальная порода угольных шахт Донбасса содержит уран. Концентрация урана изменяется в пределах от 2 до $2,6 \cdot 10^{-4}$ %. Несмотря на относительно малое содержание урана, продукт его распада – радий воздействует по интенсивности излучения в 2 млн раз больше по сравнению с ураном. «Потомком» распада радия является радон ²²²Rn, который имеет малый период полураспада (3,825 суток). В цепи распада радона образуется торий-232, который распадается с образованием радона-220 с периодом полураспада всего 54,5 с. Продукты полураспада радона имеют электрический заряд и способны присоединяться к аэрозольным частицам, абсорбироваться

на пористых частицах пыли, и таким образом, относительно инертные частицы пыли являются «снарядами», бомбардирующими легкие населения Донбасса. Отрицательное действие излучения от продуктов распада может быть снижено именно за счет уменьшения их переноса с частицами пыли.

Основной причиной вредного воздействия на окружающую среду терриконов угольных шахт, находящихся в эксплуатации, является поступление в атмосферу продуктов горения: диоксида серы и оксида углерода [9]. Для горящих отвалов предусматривается их тушение и формирование плоских отвалов.

Формирование плоских отвалов осуществляется послойно. Толщина каждого слоя не должна превышать пожароопасных величин. Отсыпка каждого последующего слоя осуществляется только после снижения воздухопроницаемости заложенного слоя до приемлемых значений. В некоторых случаях допускается возможность формирования пожароопасных отвалов с повышенной толщиной слоя, однако высота слоя не должна превышать 10 метров.

Для снижения воздухопроницаемости и, соответственно, предотвращения загрязнения атмосферы диоксидом серы и пылью, а гидросферы – соединениями тяжелых металлов используется уплотнение породы и укладка слоев с учетом углов откоса и состава породы. Институт УкрНИИпроект выполнил комплекс исследований по влиянию степени уплотнения различных материалов на коэффициент воздухопроницаемости.

Выполненная нами обработка указанных экспериментальных данных показала, что коэффициент воздухопроницаемости является экспоненциальной функцией степени уплотнения (рис. 1).

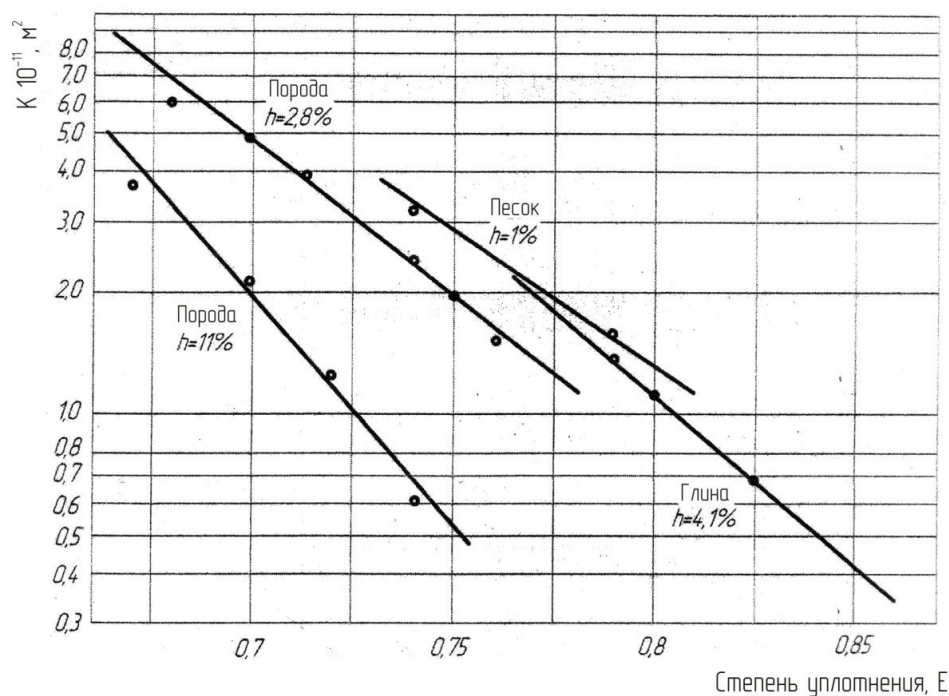


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента воздухопроницаемости от степени уплотнения.

Для обеспечения одинакового коэффициента воздухопроницаемости для отвальной породы требуется значительно меньшая степень уплотнения по сравнению с песком и глиной. Кроме этого, увеличение влажности породы, например, в 4 раза при одинаковом значении степени уплотнения 0,725 уменьшает коэффициент воздухопроницаемости в 3 раза.

Аналитическая зависимость коэффициентов воздухопроницаемости от степени уплотнения для влажности породы 2,8 и 11 % описываются следующими уравнениями:

$$k = 1,35 \cdot 10^{-5} \exp(-17,9 P); h = 2,8 \%,$$

$$k = 1,70 \cdot 10^{-5} \exp(-25,87 P); h = 11 \%,$$

где P – давление, МН/м²;

h – относительная влажность, %.

Приведенные данные показывают, что при сооружении плоских отвалов необходимым условием снижения воздухопроницаемости, кроме уплотнения, является увлажнение породы.

Самую низкую воздухопроницаемость имеет глина, она же поддается самой высокой степени уплотнения даже при относительно небольшой влажности. Слои глины целесообразно использовать для создания как водо- так и воздухоплотных экранов под и над слоями породы.

В последние годы во многих крупных городах Украины отмечается значительное повышение уровня грунтовых вод из-за техногенных подтоплений. В угольных бассейнах это в значительной степени обусловлено закрытием нерентабельных шахт. Более распространены обводнения территорий городов через утечки воды из водонесущих коммуникаций – водопроводов, канализации и тепловых сетей. На большей части территории Донбасса залегают макропористые лессовые грунты (65 % площади) – ими сложены Волынская и Подольская возвышенности, междуречье Днестра и Днестра, Причерноморская впадина и Приазовье. Толщина лессовых грунтов составляет от 3 до 35 м, а просадочность при давлении 0,3 МПа составляет от 0,01 до 0,15.

В пределах Украины макропористые лессовидные грунты подстилаются глинистыми практически водонепроницаемыми грунтами, поэтому образование водоносного горизонта из местных скоплений грунтовых вод практически неизбежно. Питание таких горизонтов в последнее время обеспечивается утечками из водонесущих коммуникаций, изношенность которых в ряде городов дошла до 80 %. При малой естественной влажности лесс достаточно прочен, но с увеличением влажности, особенно при обводнении, лессовидные грунты склонны к значительным просадкам в результате возникновения тиксотропного эффекта. Просадки обуславливают возникновение уступов на земной поверхности, которые вызывают деформации трубопроводов и, в свою очередь, еще большее обводнение. Просадочные деформации зданий и промышленных сооружений отмечаются в городах: Донецке, Горловке, Енакиеве, Запорожье, Днепропетровске, Херсоне, Краматорске и многих других городах.

Уступ на земной поверхности представляет террасообразную локальную сдвижку соседних блоков горных пород с выпукло-вогнутым профилем (рис. 2) из-за наличия на коренных скальных породах чехла четвертичных отложений, чаще всего, суглинков. Высота уступов достигает 50...60 см, они разрушают любые сооружения, под которыми образовались. На 1 км створа вкрест простирания на подработанной территории в среднем приходится около 60 уступов, 78 % из них – малые, меньше 10 см [10], практически безопасные для сооружений и коммуникаций. Но 22 % уступов – большие, на километр створа вкрест простирания это около 13 уступов. Строительство любых сооружений не допускается без особых мероприятий, если ожидаемая высота уступов 25 и более см.



Рисунок 2 – Уступ высотой 52 см на улице Матросова (г. Горловка).

В г. Горловка теряется 40...60 % очищенной питьевой воды. Причиной является изношенность водопроводных сетей и подработанность территорий их размещения.

Согласно информации из официальных источников, в городах Донбасса огромные потери очищенной воды вызваны износом сетей. Так, в Горловке теряется около двух третей воды, подаваемой из фильтровальных станций в разводящую сеть. Для устранения потерь необходимы огромные масштабы работ по реконструкции сетей. На западе разработаны передовые технологии реконструкции сетей водоснабжения без разрытия улиц. Их применение очень перспективно, но требует больших капиталовложений. Для повышения надёжности эксплуатации водных коммуникаций необходима замена разводящих сетей малого диаметра, среди которых еще много чугунных водопроводов с раструбным соединением, на полиэтиленовые трубопроводы. Сравнивая стоимости трубопроводов полиэтиленовых и стальных, можно отметить, что для диаметров до 400 мм и давления 0,6 МПа (6 атм) они примерно одинаковы.

Оценка неблагоприятного воздействия сброса шахтных вод на состояние поверхностных водных объектов приведена авторами в [11].

ВЫВОД

1. Основные виды неблагоприятных воздействий шахт на окружающую среду включают эмиссию метана с вентиляционными выбросами, подработку территорий в селитебных зонах, поступление в поверхностные водоемы высокоминерализованных шахтных вод и загрязнение атмосферы, обусловленное горением и пылением терриконов.

2. Для снижения воздействия на климат парникового газа – метана предпочтительно применение дегазации породы с использованием гидродинамического воздействия.

3. Снижение неблагоприятного воздействия терриконов на состояние атмосферы, обусловленное пылением и самовоспламенением пород, достигается путем создания защитных экранов из полимерных композиций, организации плоских отвалов и создания экранов из глины.

4. Полученные аналитические зависимости коэффициентов фильтрации различных пористых сред показывают, что наибольшими экранизирующими свойствами обладают увлажненные слои глины. Их использование позволяет предотвратить или значительно снизить загрязнение атмосферы диоксидом серы как продуктам окисления и сульфида железа, пирита и образующегося сернистого водорода при воздействии среды с низким уровнем pH. Учитывая наличие кислотных дождей в регионе, воздействие осадков с низким уровнем pH является основной причиной загрязнения атмосферы токсичным сероводородом.

5. Приведена характеристика уступов поверхности Земли над территориями выработанных шахтных полей, которые вызывают повреждение зданий, сооружений и коммуникаций в городах Донбасса. Закрытие шахт и их затопление также вызывают необратимые воздействия на территорию в результате возникновения тиксотропного эффекта и заболачивания поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ластовецкий, В. П. Добыча метана в Кузнецком угольном бассейне и напряженно-деформированное состояние пород [Текст] / В. П. Ластовецкий // Изв. ВУЗ Горн. журнал. – 2003. – № 1. – С. 44–52.
2. Гулько, С. Е. Технологические риски при эксплуатации и закрытии угольных шахт [Электронный ресурс] / С. Е. Гулько // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах : Материалы XII Международной научно-практической конференции / Под ред. : С. Г. Костюк. – Кемерово : КузГТУ, 2017. – С. 110–1–110–11. – Режим доступа : <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/BGD/2017/bgd2017/pages/Articles/110.pdf>.
3. Ренер, В. Утилизация рудничного газа в немецкой каменноугольной промышленности [Текст] / В. Ренер // Глюкауф. – 2003. – № 1. – С. 30–34.
4. Пучков, Л. А. Геомеханическое обоснование и разработка технологии извлечения метана из угольных пластов в режиме кавитации с использованием энергии массива [Текст] / Л. А. Пучков, С. В. Сластунов, Г. Н. Фейт / ФТПРПИ. – 2002. – № 4. – С. 11–15.
5. Трубецкой, К. Н. Повышение эффективности подземной разработки высокогазоносных угольных месторождений на основе организации совместной добычи угля и метана [Текст] / К. Н. Трубецкой // Уголь. – 2003. – № 9. – С. 3–6.
6. Софийский, К. К. Нетрадиционные способы предотвращения выбросов и добычи угля [Текст] / К. К. Софийский, А. П. Калфакчян, Е. А. Воробьев. – М. : Недра, 1994. – 192 с.
7. Агурова, И. В. К вопросу изучения условий произрастания растений на отвалах угольных шахт Донбасса [Текст] / И. В. Агурова, О. Н. Горохова // Мировые инновационные технологии восстановления нарушенных и загрязненных земель техногенных регионов : Сборник материалов международной научно-практической конференции / Кемеровский ЧСХИ. – Кемерово: ПГ КО «Кемеровский полиграфкомбинат», 2008. – С. 16–18.

8. Лычагин, Е. В. Совершенствование методов закрепления пылящих поверхностей [Текст] / Е. В. Лычагин, И. В. Сеница // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2007. – № 8. – С. 136–140.
9. Саранчук, В. И. Борьба с горением породных отвалов [Текст] / В. И. Саранчук. – К.: Наукова думка, 1978. – 268 с.
10. Вдосконалення моделі утворення уступу [Текст] / О. Г. Сірик, В. О. Пеньков, О. В. Грабар, М. В. Васечкін // Містобудування та територіальне планування. – 2004. – Вип. 18. – С. 149–157.
11. Высоцкий, С. П. Снижение вредного воздействия горных предприятий на окружающую среду [Текст] / С. П. Высоцкий, С. Е. Гулько // Научный вестник НИИГД Респиратор. – Донецк, 2017. – № 1 (54). – С. 65–74.

Получено 03.09.2017

С. П. ВИСОЦЬКИЙ^a, С. Є. ГУЛЬКО^b

ЕКОЛОГІЧНІ РИЗИКИ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ЗАКРИТТІ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

^a ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури», ^b Донгіпрошахт

Анотація. Технічні ризики при експлуатації і закритті вугільних шахт несприятливо впливають на навколишнє середовище, що зумовлює забруднення атмосфери парниковим газом-метаном і продуктами горіння породних відвалів, забруднення поверхневих і підземних водних джерел високомінералізованими шахтними водами, небезпеку руйнування будівель, споруд та комунікацій при їх розміщенні над територіями підроблюваних шахтних полів. Обґрунтовано використання методів дегазації вугільних пластів і застосування мікробіологічної деструкції метану з використанням бактерій. Для зниження несприятливого впливу териконів обґрунтовано спорудження плоских відвалів і використання «глиняних» екранів. Наведено характеристику впливу розробок на стан земної поверхні, які спричиняють небезпеку руйнування будівель, споруд і підземних комунікацій.

Ключові слова: вугільні шахти, вплив, метан, дегазація, терикони, розробка.

SERGEY VYSOTSKY^a, SERGEY GULKO^b

ENVIRONMENTAL RISKS IN THE OPERATION AND CLOSURE OF COAL MINES

^a Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, ^b Dongiproshakht

Abstract. The technical risks associated with the operation and closure of coal mines include the adverse environmental impact caused by: atmospheric pollution by greenhouse gas methane and combustion products of rock dumps, contamination of surface and underground water sources by highly mineralized mine waters, the risk of destruction of buildings, structures and communications when placed above the territories of worked-out mine fields. The use of methods for degassing coal seams and the application of microbiological destruction of methane using bacteria have been proved. To reduce the adverse impact of waste heaps, the construction of flat dumps and the use of «clay» screens have been proved. The characteristics of the impact of sub-projects on the state of the earth's surface have been given, which cause the danger of destruction of buildings, structures and underground communications.

Key words: coal mines, impact, methane, degassing, waste tanks, worked-out mine fields.

Высоцкий Сергей Павлович – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой техносферной безопасности ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: техносферная безопасность при эксплуатации промышленных предприятий, очистка промышленных и природных вод, энергосбережение.

Гулько Сергей Евгеньевич – кандидат технических наук, директор института Донгипрошахт. Научные интересы: защита окружающей среды, экологические проблемы при эксплуатации и закрытии угольных шахт, очистка шахтной воды.

Висоцький Сергій Павлович – доктор технічних наук, професор; завідувач кафедри техносферної безпеки ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: техносферна безпека при експлуатації промислових підприємств, очищення промислових і природних вод, енергозбереження.

Гулько Сергій Євгенович – кандидат технічних наук, директор інституту Донгіпрошахт. Наукові інтереси: захист навколишнього середовища, екологічні проблеми при експлуатації та закритті вугільних шахт, очищення шахтної води.

Vysotsky Sergey – D. Sc. (Eng.), Professor, the Head of the Technosphere Safety Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: technospheric safety during operation of industrial enterprises, purification of industrial and natural waters, energy saving.

Gulko Sergey – Ph. D. (Eng.), Director of the Dongiproshakht Institute. Scientific interests: environmental protection, environmental problems in the operation and closure of coal mines, cleaning of mine water.

УДК 536.2, 514.18

О. С. ВОРОНОВА

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА

Аннотация. В данной статье проведен анализ существующих подходов аналитического описания и моделирования процессов конвективного теплообмена применительно к задачам технической термодинамики и теплопередачи, а также выявлены недостатки каждого из них. Для усовершенствования расчета процессов конвективного тепломассообмена предлагается использовать математический аппарат геометрического моделирования процессов и явлений – БН-исчисление, что позволяет получить необходимые значения параметров жидкости и исследовать их с помощью методов математического анализа.

Ключевые слова: конвективный теплообмен, тепломассообмен, дифференциальные уравнения, параметры жидкости, геометрическое моделирование, БН-исчисление.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Исследования, посвящённые тепломассообменным процессам применительно к задачам технической термодинамики и теплопередачи, являются одной из актуальных, сложных и до конца не решённых проблем теории тепломассообмена.

Теплообмен – это процесс переноса теплоты, который происходит между телами, имеющими различную температуру. Многие процессы переноса теплоты сопровождаются переносом вещества и этот процесс называется массообменом. Теория теплообмена [1–3] изучает процессы распространения теплоты в твердых, жидких и газообразных телах, при которых теплота может передаваться тремя простейшими принципиально отличными друг от друга способами:

1. Теплопроводность – это процесс передачи теплоты внутри одного тела или при непосредственном соприкосновении тел, обусловленная тепловым движением микрочастиц.
2. Конвекция – это процесс передачи теплоты в результате движения и перемешивания частиц жидкостей или газов.
3. Теплообмен излучением – процесс передачи теплоты с помощью электромагнитных волн или лучей.

Наибольший интерес, с точки зрения моделирования, представляет собой конвективный теплообмен. Это вид теплообмена, при котором совместно протекают процессы конвекции и теплопроводности. Конвективный теплообмен широко распространен в природе, технике и быту. Конвекция происходит только в газах и жидкостях и состоит в том, что объемы жидкости или газа, перемещаясь из области с большей температурой в область с меньшей температурой, переносят с собой теплоту. Конвективный теплообмен зависит от условий движения вещества, в связи с этим различают естественную и вынужденную конвекцию. Конвективный перенос теплоты в значительной мере определяется режимом течения жидкости, которое может быть ламинарным или турбулентным [1–3].

При решении задачи технической термодинамики и теплопередачи процесс теплоотдачи описывается уравнением Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha \cdot (t_c - t_{жс}) \cdot F, \quad (1)$$

где Q – тепловой поток, Вт;
 α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

$t_c, t_{ж}$ – температуры поверхности твердого тела (стенки) и жидкости, К;
 F – площадь поверхности теплообмена, м².

Теплоотдача является достаточно сложным процессом, а коэффициент теплоотдачи зависит от многих параметров [1, 3]. Математическая зависимость коэффициента теплоотдачи может быть представлена в виде:

$$\alpha = f(w, \lambda, \nu, \rho, C, X, t_n, t_{ж}, \Phi, l_1, l_2, l_3 \dots), \quad (2)$$

где w – скорость движения вещества м/с;
 λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);
 ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;
 ρ – плотность жидкости, кг/м³;
 C – удельная теплоемкость, кДж/(кг·°С);
 X – режим движения жидкости;
 Φ – форма поверхности тела;
 l_1, l_2, l_3 – размеры поверхности тела.

Исходя из вышесказанного, рассмотрим существующие подходы аналитического описания и моделирования процессов конвективного тепломассообмена.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Было выделено три принципиальных подхода к моделированию процессов конвективного теплообмена.

Дифференциально-интегральный подход. Применяя общие законы физики, можно составить дифференциальные уравнения для конвективного теплообмена, учитывающие как тепловые, так и гидродинамические явления в любом процессе. Система дифференциальных уравнений конвективного тепломассообмена состоит из уравнений теплоотдачи, энергии, неразрывности и движения [1–3]. Решение системы дифференциальных уравнений конвективного тепломассообмена средствами математического анализа связано с большими трудностями, поэтому на практике такие задачи решаются численными методами с применением ЭВМ, либо экспериментальным путем.

Численный подход основан на численных методах решения системы дифференциальных уравнений теплоотдачи, энергии, неразрывности и движения. Данный подход является частью дифференциально-интегрального подхода, но в виду его широкого использования в системах автоматизированного проектирования было решено выделить его отдельно. В настоящее время существует большое множество различных методов численного решения задач конвективного теплообмена. Так, следует выделить метод конечных разностей, метод конечных элементов, метод конечных объемов, вихревые методы и др. [4–9].

Численные методы основываются на том, что расчетную область необходимо разбить с помощью сетки на небольшие соприкасающиеся объемы или ячейки расчетной сетки, далее составляется глобальная матрица и решается система линейных алгебраических уравнений. Используя этот подход, был разработан целый ряд коммерческих и свободно распространяемых программных пакетов [7, 8], таких как ANSYS CFX, ANSYS FLUENT, FlowVision, PHOENICS, TascFlow, Star-CD, SINF, SigmaFlow и ряд других, которые основываются на численном решении системы дифференциальных уравнений различными алгоритмами.

Теория подобия и критериальный подход. При изучении конвективного теплообмена основную роль играет эксперимент. Используя теорию подобия и анализ критериев [1, 2], которые были введены В. Нуссельтом в 1910 г., результаты единичных опытов удастся обобщить на все сходные случаи. Такое обобщение позволяет получить зависимости коэффициента теплоотдачи от всех влияющих параметров величин.

Для уменьшения числа независимых переменных была разработана теория подобия. Уравнения подобия позволяют выразить обобщенную зависимость между величинами параметров, которые характеризуют процесс, и являются справедливыми для всех подобных между собой процессов [1, 3].

В общем виде критериальное уравнение конвективного теплообмена имеет вид:

$$Nu = c \cdot Re^n \cdot Pr^m \cdot Gr^b \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (3)$$

где c, n, m, b – постоянные величины, которые зависят от конкретных условий и определяются опытным путем;
 Nu, Re, Pr, Gr – критерии подобия [1–3];
 $(Pr / Pr_{cm})^{0,25}$ – поправка, учитывающая направление теплового потока.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Разработать теоретические основы использования геометрического моделирования реализованного в БН-исчислении (точечное исчисление Балюбы-Найдыша) [10–12] для аналитического описания тепломассообменных процессов применительно к задачам технической термодинамики и теплопередачи.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

В рассмотренных выше существующих подходах аналитического описания и моделирования процессов конвективного теплообмена следует выделить ряд недостатков.

Конвективный теплообмен описывается системой дифференциальных уравнений и условиями однозначности, которые содержат большое количество неизвестных. Попытки аналитического решения этой системы уравнений наталкиваются на серьезные трудности, так как при решении задач конвективного теплообмена приходится делать целый ряд упрощений, которые могут существенно отличаться от реальных условий протекания процессов тепломассообмена.

К недостаткам численного подхода следует отнести то, что решение системы дифференциальных уравнений конвективного теплообмена может рассматриваться в линейной и нелинейной постановках. Линейное решение уравнений может давать большие погрешности в вычислении, так как связано со значительным упрощением. Решение нелинейных уравнений, не имеющих определенной структуры, дает более достоверные результаты, однако это весьма сложный и продолжительный процесс, который требует больших вычислительных ресурсов. Результаты расчетов сильно зависят от геометрической формы исследуемой области, которая может быть сложной и незакономерной, от изменения свойств вещества, а также особенностей выбранного программного пакета. Следует обратить внимание, что если представленная задача имеет более одного решения, то трудно выявить, какой из результатов расчета является правильным и как он согласуется с реальным протеканием процесса движения вещества. В таких случаях возникает необходимость экспериментального обоснования численного подхода в исследовании.

Недостаток критериального подхода заключается в трудности распространения полученных соотношений на широкий спектр задач, так например, свободная или вынужденная конвекция, ламинарный или турбулентный режим течения вещества, несжимаемое или сжимаемое течение. Полученное при обработке результатов единичного опыта критериальное уравнение может быть справедливым только в пределах изменения определяющих и параметрических критериев подобия, которые имели место в ходе проведения опыта. Зона действия критериального уравнения имеет определенные ограничения. В центральной части зон ламинарного или турбулентного режимов соблюдается закономерность течения жидкости, но чем ближе граница $Re < 2320$ и $2320 < Re$ [1], тем более вероятность погрешности в определении режима течения жидкости. Следует отметить, что во многих случаях процедура измерения бывает затруднительна, а оборудование для измерения не застраховано от погрешностей.

Несмотря на перечисленные выше недостатки, критериальный подход, который базируется на экспериментальных данных, с практической точки зрения остается наиболее предпочтительным. Если стадии получения экспериментальных данных, нельзя избежать, то можно воспользоваться матрицей планирования эксперимента с его дальнейшим аналитическим описанием методами геометрического моделирования. Для этого нужно зафиксировать несколько значений параметров, которые характеризуют состояние жидкости, и смоделировать весь процесс в целом как геометрический объект многомерного аффинного пространства. Таким образом, возможно избежать всех промежуточных уточняющих коэффициентов и критериев.

Для усовершенствования расчета процессов конвективного тепломассообмена предлагается использовать математический аппарат геометрического моделирования процессов и явлений – БН-исчисление.

Обоснование выбора БН-исчисления в качестве аппарата геометрического моделирования тепломассообменных процессов:

1. Основным элементом БН-исчисления является точка, которая характеризуется рядом параметров. Количество параметров, которые определяют точку в пространстве, зависит от размерности этого пространства. А любой геометрический объект является организованным множеством точек. Поэтому точечные уравнения, которые определяют геометрический объект в пространстве, справедливы для пространства любой размерности. Эта особенность БН-исчисления дает возможность представлять геометрические объекты в многомерном пространстве. Исходя из этого, можно сделать вывод, что геометрическая модель, представленная в БН-исчислении, является организованным множеством точек, которые зависят от нескольких, связанных между собой, текущих параметров [10–12].

2. Точечные уравнения геометрических объектов инвариантны относительно размерности пространства глобальной системы координат. То есть в качестве параметров выбираются такие параметры, которые являются инвариантными относительно параллельного проецирования (например, простое отношение трех точек прямой). Поэтому точечные уравнения справедливы для пространства любой размерности.

3. Точечное исчисление позволяет работать в локальном симплексе, а результат получать в глобальном симплексе. Причем переход от локального симплекса к глобальному осуществляется автоматически.

4. В БН-исчислении был разработан специальный метод подвижного симплекса, который позволяет конструировать геометрические объекты любой сложности с наперед заданными характеристиками. Использование метода подвижного симплекса позволяет установить зависимость между несколькими параметрами, что, в свою очередь, позволяет моделировать многопараметрические явления и процессы, учитывая не только независимые параметры, но и параметры, которые зависят один от другого [13].

5. В БН-исчислении каждой геометрической операции соответствует аналитическая операция. Таким образом, БН-исчисление позволяет представить любой геометрический алгоритм построения объекта в аналитическом виде, или в виде точечного уравнения, или в виде расчетного алгоритма, который, по сути, является упорядоченным множеством точечных уравнений. Поэтому в точечных уравнениях сохраняется наглядный геометрический смысл параметров, который известен из геометрического алгоритма построения объекта.

6. Точечные уравнения, по сути, являются символьной записью. Переходя к глобальной декартовой системе координат, точечные уравнения заменяются на систему однотипных параметрических уравнений, количество которых зависит от размерности пространства глобальной системы координат. Поэтому точечные уравнения и расчетные алгоритмы на их основе легко программируются на ЭВМ.

Рассмотрим более подробно теоретические основы общего подхода к конструированию геометрических объектов в n -мерном аффинном пространстве на основе заданного дискретного массива точек арифметического пространства (рис. 1, 2).

Под геометрическим моделированием процессов конвективного теплообмена следует понимать тот факт, что определенному процессу или явлению соответствует конкретный геометрический объект. Таким образом, в зависимости от количества факторов варьирования геометрический объект будет принадлежать соответствующему пространству. Например, однофакторному процессу ставится в соответствие однопараметрическое множество точек или линия (рис. 1а). Линия определяется как организованное множество точек в симплексе ABC с помощью текущего параметра u , который, двигая текущую точку P , формирует дугу кривой.

$$P_1 = (A_1 - C_1)p_1(u) + (B_1 - C_1)q_1(u) + C_1, \quad (4)$$

где A_i, B_i, C_i – точки, определяющие симплекс плоскости;
 $p_i(u)$ и $q_i(u)$ – функции параметра u , которые определяют движение точки P .

Двухфакторному процессу ставится в соответствие двухпараметрическое множество точек, которое как геометрический объект является поверхностью (рис. 1б).

$$\begin{cases} P_1 = (A_1 - C_1)p_1(u) + (B_1 - C_1)q_1(u) + C_1, \\ P_2 = (A_2 - C_2)p_2(u) + (B_2 - C_2)q_2(u) + C_2, \\ Q_1 = (P_1 - C_2)\phi_1(v) + (P_2 - C_2)f_1(v) + C_2, \end{cases} \quad (5)$$

где $\phi_i(v)$ и $f_i(v)$ – функции параметра v , которые определяют движение точки Q .

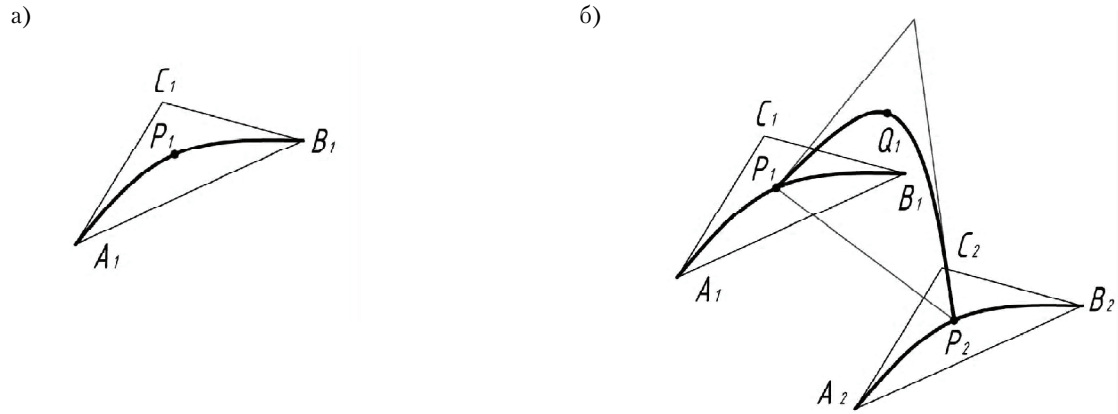


Рисунок 1 – Геометрическая схема конструирования: а) одно и б) двухпараметрического процесса.

Обобщая, трехфакторному процессу ставим в соответствие трехпараметрическое множество точек или гиперповерхность (рис. 2).

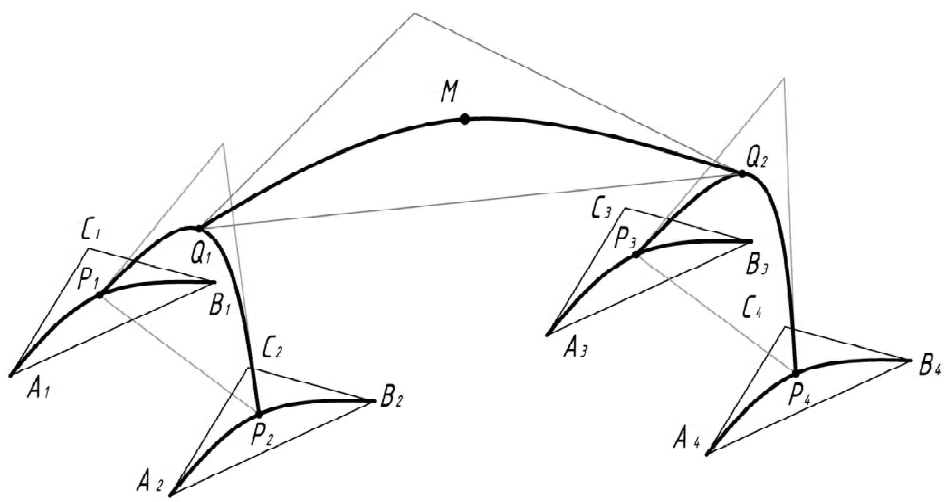


Рисунок 2 – Геометрическая схема конструирования трехпараметрического процесса.

$$\begin{cases}
 P_1 = (A_1 - C_1)p_1(u) + (B_1 - C_1)q_1(u) + C_1, \\
 P_2 = (A_2 - C_2)p_2(u) + (B_2 - C_2)q_2(u) + C_2, \\
 P_3 = (A_3 - C_3)p_3(u) + (B_3 - C_3)q_3(u) + C_3, \\
 P_4 = (A_4 - C_4)p_4(u) + (B_4 - C_4)q_4(u) + C_4, \\
 Q_1 = (P_1 - C_2)\phi_1(v) + (P_2 - C_2)f_1(v) + C_2, \\
 Q_2 = (P_3 - C_4)\phi_2(v) + (P_4 - C_4)f_2(v) + C_4, \\
 M = (Q_1 - C_4)\mu(w) + (Q_2 - C_4)\eta(w) + C_4.
 \end{cases} \quad (6)$$

где $\mu(w)$ и $\eta(w)$ – функции параметра w , которые определяют движение точки M .

Аналогичным образом можно сконструировать любой многопараметрический геометрический объект, который будет аналитически описывать многофакторные процессы и явления живой природы, техники, технологии, экономики, строительства и архитектуры в многомерном аффинном пространстве, и получить его аналитическое представление в виде расчетного точечного алгоритма.

ВЫВОДЫ

В статье проанализированы и классифицированы существующие подходы моделирования теплообменных процессов применительно к задачам технической термодинамики и теплопередачи, а также выявлены их недостатки. Обоснован выбор метода многомерного геометрического моделирования, реализованного в БН-исчислении, что позволяет избежать приведенных выше недостатков для решения задач конвективного тепломассообмена. Разработаны теоретические основы геометрического моделирования тепломассообменных процессов в БН-исчислении, которые позволяют получить необходимые значения параметров жидкости и исследовать их с помощью методов математического анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирам, А. О. Техническая термодинамика. Тепломассообмен: Учебное издание [Текст] / А. О. Мирам, В. А. Павленко. – М. : АСВ, 2011. – 352 с.
2. Мухачев, Г. А. Термодинамика и теплопередача [Текст] : Учеб. для авиац. вузов / Г. А. Мухачев, В. К. Щюкин. – 3-е изд., перераб. – М. : Выс шк., 1991. – 480 с.
3. Михеев, М. А. Основы теплопередачи [Текст] / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – Изд. 2-е, стереотип. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.
4. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости [Текст] : Пер. с англ. / С. Патанкар. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
5. Андерсон, Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен [Текст] : [пер. с англ.]. В 2 ч. Ч. 1. / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер ; под ред. Г. Л. Подвидза. – М. : Мир, 1990. – 384 с.
6. Андерсон, Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен [Текст] : [пер. с англ.]. В 2 ч. Ч. 2. / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер ; под ред. Г. Л. Подвидза. – М. : Мир, 1990. – 336 с.
7. Смирнов, Е. М. Метод конечных объемов в приложении к задачам гидрогазодинамики и теплообмена в областях сложной геометрии [Текст] / Е. М. Смирнов, Д. К. Зайцев // Научно-технические ведомости. – 2004. – № 2. – С. 70–81.
8. Сравнительный анализ CFD-пакетов SigmaFlow и Ansys Fluent на примере решения ламинарных тестовых задач [Текст] / Д. В. Платонов, А. В. Минаков, Е. Б. Харламов, А. А. Дектерев // Вестн. Томск. гос. ун-та. матем. и мех. – 2013. – № 1(21). – С. 84–94.
9. Никонов, В. В. Развитие вихревых методов расчета обтекания тел несжимаемыми невязким и невязким потоками [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 01.02.05 / Никонов В. В. – Самара, 2007. – 174 с.
10. Балюба, И. Г. Конструктивная геометрия многообразий в точечном исчислении [Текст] : диссертация на соискание научной степени доктора технических наук : 05.01.01 / Балюба Иван Григорьевич. – Макеевка, 1995. – 227 с.
11. Найдеш, В. М. Алгебра БН-исчисления [Текст] / И. Г. Балюба, В. М. Верещага, В. М. Найдеш // Прикладна геометрія та інженерна графіка : Міжвідомчий науково-технічний збірник. – К. : КНУБА, 2012. – Вип. 90. – С. 210–215.
12. Балюба, И. Г. Точечное исчисление [Текст] : учебное пособие / И. Г. Балюба, В. М. Найдеш. – Мелитополь : МГПУ им. Б. Хмельницкого, 2015. – 236 с.
13. Давиденко, И. П. Конструювання поверхонь просторових форм методом рухомого симплексу [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.01.01 / И. П. Давиденко ; Тавр. держ. агротехнол. ун-т. – Мелітополь, 2012. – 186 с.

Получено 04.09.2017

О. С. ВОРОНОВА

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ
КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМІНУ

ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

Анотація. У даній статті проведено аналіз існуючих підходів аналітичного опису і моделювання процесів конвективного теплообміну стосовно завдань технічної термодинаміки і теплопередачі, а також виявлені недоліки кожного з них. Для удосконалення розрахунку процесів конвективного тепломассообміну пропонується використовувати математичний апарат геометричного моделювання процесів і явищ – БН-числення, що дозволяє отримати необхідні значення параметрів рідини і досліджувати їх за допомогою методів математичного аналізу.

Ключові слова: конвективний теплообмін, тепломассообмін, диференціальні рівняння, параметри рідини, геометричне моделювання, БН-числення.

OLGA VORONOVA
THEORETICAL FOUNDATIONS OF GEOMETRICAL MODELING OF
CONVECTIVE HEAT EXCHANGE

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. In this paper, an analysis of existing approaches to analytical description and simulation of convective heat transfer processes in relation to the problems of technical thermodynamics and heat transfer has been considered, and the shortcomings of each of them have been revealed. To improve the calculation of convective heat and mass transfer processes, it is proposed to use the mathematical apparatus of geometrical modeling processes and phenomena – BN- calculation, which will allow obtaining the necessary values of the parameters of the liquid and investigating them with the help of mathematical analysis methods.

Key words: convective heat transfer, heat and mass transfer, differential equations, fluid parameters, geometric model, BN-calculation.

Воронова Ольга Сергеевна – магистр архитектуры, ассистент кафедры специализированных информационных технологий и систем ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: геометрическое и компьютерное моделирование процессов конвективного теплообмена применительно к задачам технической термодинамики и теплопередачи.

Воронова Ольга Сергіївна – магістр архітектури, асистент кафедри спеціалізованих інформаційних технологій та систем ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: геометричне та комп'ютерне моделювання процесів конвективного тепломасообміну стосовно завдань технічної термодинаміки і теплопередачі.

Voronova Olga – Master of Architecture, Assistant, Specialized Information Technology and Systems Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: geometric and computer modeling of convective heat and mass transfer processes in relation to the problems of technical thermodynamics and heat transfer.

УДК 629.3.027.5.002.8:628.475.4

Ю. А. НОВИЧКОВ

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

АНАЛИЗ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА ОТРАБОТАННЫХ АВТОТРАКТОРНЫХ ШИН

Аннотация. Проведен анализ количественных показателей выхода жидких и твердых продуктов низкотемпературного пиролиза отработанных шин. Определены зависимости выхода от времени проведения реакции, а также выхода от температуры процесса. Аналитические зависимости позволяют определить важные параметры технологии рециклинга резинотехнических изделий, что дает возможность обоснованного подхода к проектированию установок пиролизической переработки изношенных автотракторных шин.

Ключевые слова: изношенные автомобильные шины, пиролиз, вторичные продукты, технологический режим, аналитические зависимости, экологическая безопасность.

ВВЕДЕНИЕ

По данным Европейской Ассоциации по вторичной переработке шин (ETRA, www.etra-eu.org), только в 2008 г. в странах ЕС при эксплуатации транспортных средств было образовано более 2,6 млн т изношенных автомобильных шин [1]. Следует отметить, что уровень утилизации изношенных автомобильных шин в большинстве стран Западной Европы не превышает 30 % [2]. Годовой объем образования изношенных автомобильных шин в Украине составляет около 315 тыс. т/год и около 360 тыс. т/год – резиносодержащих отходов, которые также могут быть использованы в качестве вторичного энергетического сырья [1]. По состоянию на январь 2010 года, согласно справке ГАИ, только в Донецкой области было зарегистрировано 881,7 тыс. автотранспортных средств. Это означает, что за 4 года эксплуатации прирост отработанных шин составит более 3,5 млн штук. Уровень переработки данного вида отходов в нашем регионе более скромный по сравнению с европейским, однако на протяжении последних 7–10 лет намечалась устойчивая тенденция к увеличению объема их утилизации. Одним из широко распространенных видов рециклинга отработанных шин является способ низкотемпературного пиролиза [3] или газификация [4]. Он экономически привлекателен, рынок имеет изобилие пиролизных котлов, которые, по мнению рекламодателя, позволяют за относительно небольшие средства открыть надежный способ получения вторичного сырья в виде печного топлива и пиролизного углерода, суля немалую прибыль. На практике данная перспектива оказалась не такой успешной для большинства таких предложений. Многие предприниматели, которые заинтересовались прибыльным бизнесом из рекламных проспектов, столкнулись с ревизиями экологических инспекций, жалобами населения на загрязнение атмосферного воздуха и окружающей среды, а также прочими сопутствующими проблемами. Частая причина такого поворота событий проста – технологические аспекты утилизации шин способом низкотемпературного пиролиза оказались недостаточно проработанными и изученными, вторичные продукты не имели должного качества и, как следствие, не находили полномасштабного рынка сбыта. Многие разрекламированные пиролизные котлы поработали некоторое время и были порезаны на металлолом в надежде вернуть хоть какие-то затраты, оставив при этом отвалы некондиционного пиролизного углерода и кубометры низкокачественной пиролизной жидкости. Таким образом, отходы 3–4 категории опасности, которыми являются изношенные автотракторные шины, превратились в отходы 1 категории опасности, создавая угрозу здоровью населения и оказывая вредное воздействие на окружающую среду. Несмотря на значительный объем проводимых исследований в области пиролиза

шинной резины, научные изыскания по данной тематике продолжаются и круг вопросов, которые необходимо решить исследователям, достаточно велик [5].

Целью исследований является научное обоснование экологически безопасного ресурсосберегающего способа рециклинга изношенных автотракторных шин с целью усовершенствования технологического процесса и оборудования для низкотемпературного пиролиза.

МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Первостепенной задачей являлось научное обоснование процесса переработки отработанных шин способом низкотемпературного пиролиза при помощи лабораторной установки, схема которой представлена на рисунке 1.

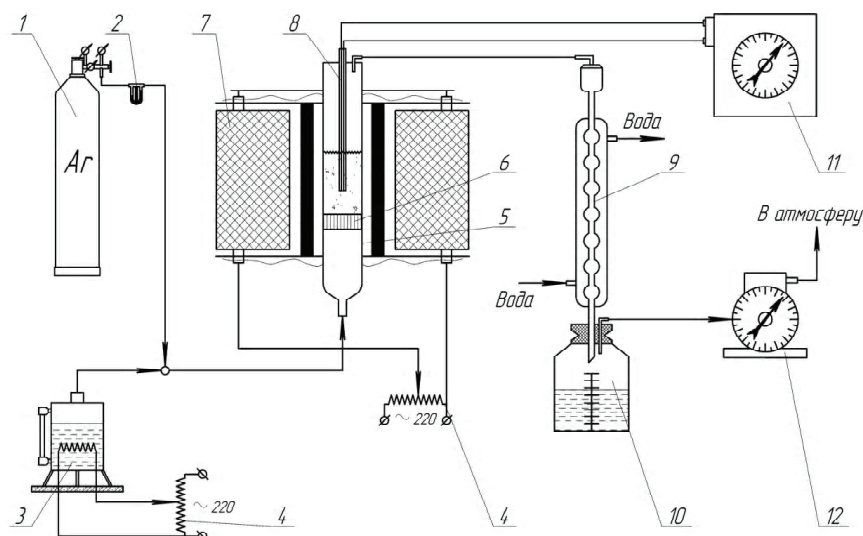


Рисунок 1 – Схема установки для пиролиза резиновой крошки: 1 – баллон с аргоном; 2 – реометр; 3 – паровой котел; 4 – лабораторный автотрансформатор; 5 – кварцевый реактор; 6 – решетка; 7 – печь; 8 – термопара; 9 – холодильник; 10 – сборник конденсата; 11 – потенциометр; 12 – газовый счетчик.

На основании ряда проведенных экспериментов и изучения результатов термогравиметрических исследований принят температурный интервал проведения реакции – 375, 450 и 525 °С. Выход продуктов пиролиза резиновой крошки, который проводился при трех разных температурах, представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Выход продуктов пиролиза резиновой крошки при различных температурах нагрева

Продукты пиролиза, % мас.	Температура, °С		
	375	450	525
Газ (η_r)	0,048–0,05	0,054–0,059	0,076–0,078
Смола + вода, ($\eta_{ж}$)	0,301–0,323	0,489–0,501	0,583–0,601
Твердый остаток, ($\eta_{тв}$)	0,601–0,61	0,392–0,4	0,31–0,316
Потери	0,05–0,017	0,065–0,04	0,031–0,005

В связи с повышенным интересом к жидким продуктам пиролиза, как альтернативе топлива, при детальном изучении экспериментальных данных был проведен анализ выхода жидких продуктов при различных температурах нагрева (таблица 2) и получена зависимость их выхода от температуры активации процесса:

$$\eta_{ж} = 1,01 \cdot \exp\left(-\frac{146,78}{T - T_H}\right), \quad (1)$$

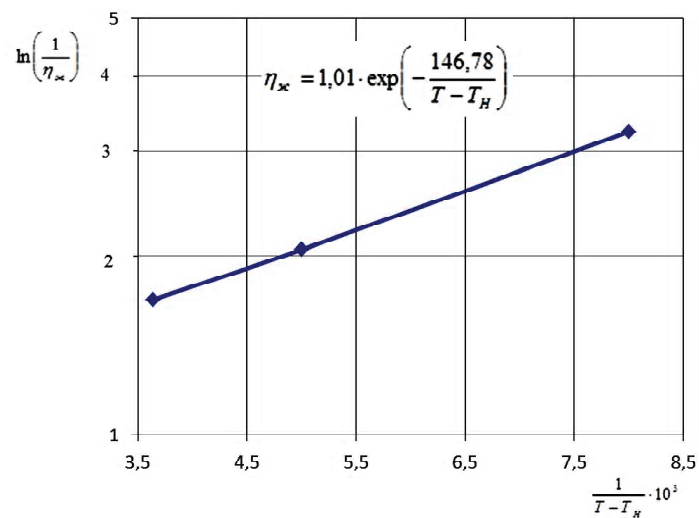
где $\eta_{ж}$ – выход жидких продуктов пиролиза (% масс.);
 T – температура деструкции (°С);
 T_H – температура начала деструкции ($T_H = 250$ °С);

Таблица 2 – Анализ выхода жидких продуктов пиролиза резиновой крошки при различных температурах нагревания

$T, ^\circ C$	$T_{пр}, ^\circ C$	$T - T_{пр}, ^\circ C$	$\eta_{ж}, \% \text{ масс.}$	$1/\eta_{ж}$	$\frac{1}{T - T_{пр}} \cdot 10^3$
375	250	125	0,31	3,23	8
450		200	0,459	2,18	5
525		275	0,592	1,7	3,64

Была установлена оптимальная температура пиролиза шинной резины, соответствующая 525 °С. При данном значении температуры выход жидкого полупродукта является максимальным, что наиболее благоприятно для получения вторичного сырья с целью последующего производства высококачественного моторного или печного топлива.

Зависимость (1) имеет графический вид, представленный на рисунке 2.

**Рисунок 2** – Зависимость выхода жидких продуктов пиролиза ($1/\eta_{ж}$) от температуры активации процесса деструкции шинной резины ($1/(T - T_{пр})$).

Экспериментальные данные относительно выхода продуктов пиролиза в зависимости от времени протекания процесса деструкции и удельной поверхности загружаемого в реактор сырья представлены в таблице 3. Образцы с удельной поверхностью $S_{уд} = 0,25 \text{ см}^2/\text{г}$ и $S_{уд} = 0,12 \text{ см}^2/\text{г}$ выбраны из соображений оптимальной загрузки камеры реактора лабораторной установки.

Таблица 3 – Выход продуктов пиролиза (η_i) в зависимости от времени протекания деструкции (τ) и удельной поверхности сырья ($S_{уд}$) (температура реакции – 525 °С)

Время τ , мин.	Выход продуктов, % масс.		
	Газ, (η_g)	Жидкость, ($\eta_{ж}$)	Твердый остаток, ($\eta_{тр}$)
Образец с удельной поверхностью $S_{уд} = 0,25 \text{ см}^2/\text{г}$			
15	0,046	0,281	0,662
30	0,064	0,44	0,554
60	0,076	0,577	0,314
90	0,081	0,6	0,304
120	0,089	0,603	0,301
Образец с удельной поверхностью $S_{уд} = 0,12 \text{ см}^2/\text{г}$			
60	0,042	0,279	0,669
90	0,059	0,4	0,631
120	0,06	0,55	0,576
240	0,078	0,598	0,321
480	0,08	0,611	0,302

На основании анализа экспериментальных данных, представленных в таблице 3, получена зависимость выхода жидких продуктов пиролиза от времени деструкции шинной резины для образца с удельной площадью поверхности $S_{y\partial} = 0,25 \text{ см}^2/\text{г}$ и $S_{y\partial} = 0,12 \text{ см}^2/\text{г}$:

$$\eta_{ж0,25} = \frac{\eta_{ж0,25}^{\max}}{1 + \frac{2,994}{e^{7,507 \cdot \tau}}}, \quad \eta_{ж0,12} = \frac{\eta_{ж0,12}^{\max}}{1 + \frac{4,52}{e^{10,675 \cdot \tau}}}, \quad (2)$$

где $\eta_{ж0,25}^{\max}$ – максимальный выход жидких продуктов для образца с удельной площадью поверхности $S_{y\partial} = 0,25 \text{ см}^2/\text{г}$ и $S_{y\partial} = 0,12 \text{ см}^2/\text{г}$, % масс.;
 τ – время деструкции, мин.

Графическая интерпретация полученной зависимости (2) представлена на рисунке 3.

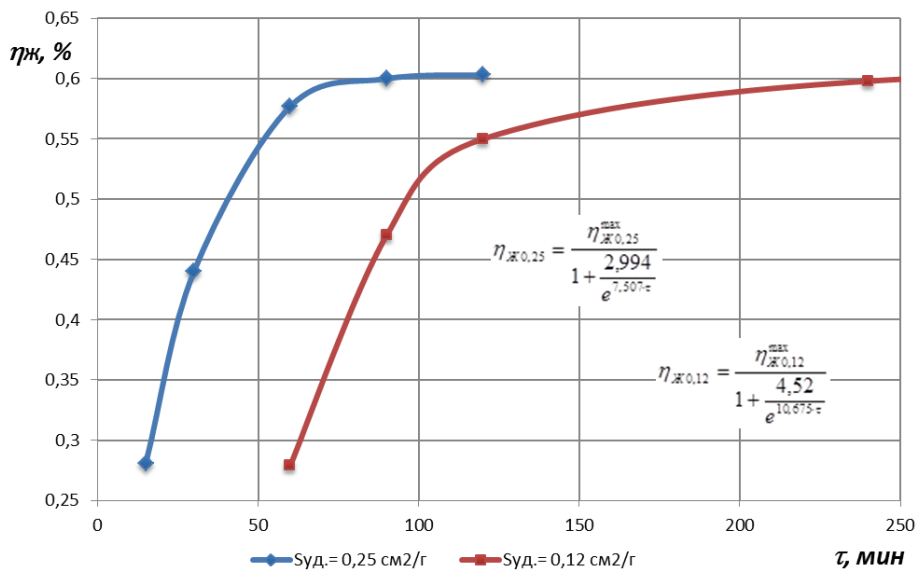


Рисунок 3 – Зависимость выхода жидких продуктов пиролиза (η , % масс.) от времени деструкции шинной резины (τ , мин) для образцов с удельной площадью поверхности $S_{y\partial} = 0,25 \text{ см}^2/\text{г}$ и $S_{y\partial} = 0,12 \text{ см}^2/\text{г}$ соответственно.

Результаты анализа экспериментальных данных выхода жидких продуктов пиролиза от времени представлены в таблице 4 и на их основании построены графики аналитических зависимостей $\ln \eta_{ж}$ от τ' для двух образцов исходного сырья с удельной площадью поверхности $S_{y\partial} = 0,25 \text{ см}^2/\text{г}$ и $S_{y\partial} = 0,12 \text{ см}^2/\text{г}$ (рисунок 4).

Таблица 4 – Анализ экспериментальных данных выхода жидких продуктов пиролиза ($\eta_{ж}$) от времени (τ) для образцов с удельной площадью поверхности $S_{y\partial} = 0,25 \text{ см}^2/\text{г}$ и $S_{y\partial} = 0,12 \text{ см}^2/\text{г}$ соответственно

Т, мин	τ' , мин	$S_{y\partial} = 0,25 \text{ см}^2/\text{г}$			$S_{y\partial} = 0,12 \text{ см}^2/\text{г}$		
		$\ln\left(\frac{\eta_{\max}}{\eta_i} - 1\right)$	$\eta = \frac{\eta_{\max}}{\eta_i} - 1$	η , % масс.	$\ln\left(\frac{\eta_{\max}}{\eta_i} - 1\right)$	$\eta = \frac{\eta_{\max}}{\eta_i} - 1$	η , % масс.
15	0,125	0,137	1,146	0,281	0,174	1,19	0,279
30	0,25	-0,994	0,37	0,44	-0,64	0,528	0,4
60	0,5	-3,1	0,045	0,577	-2,2	0,111	0,55
90	0,75	-5,299	0,005	0,6	-3,829	0,022	0,598
120	1	–	–	0,603	–	–	0,611

ВЫВОДЫ

1. Разработана опытная установка, на которой определены оптимальные параметры низкотемпературного пиролиза шинной резины.

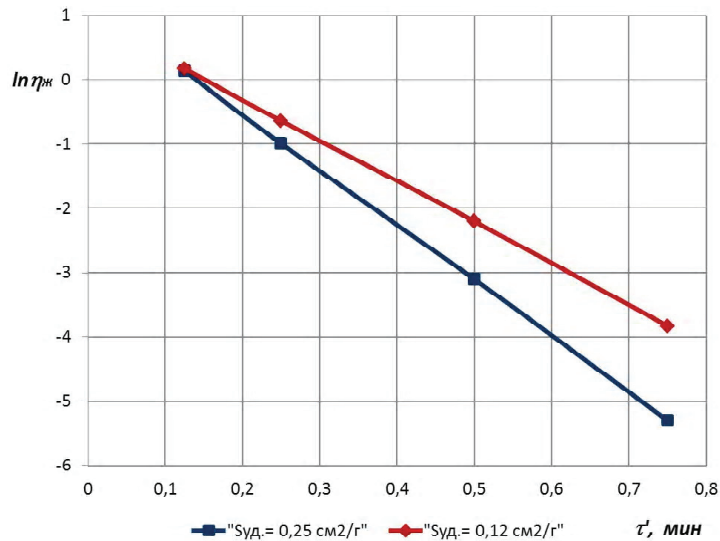


Рисунок 4 – Зависимость выхода жидких продуктов пиролиза ($\ln \eta_{ж}$) от времени деструкции (τ) для двух образцов исходного сырья с удельной площадью поверхности $S_{уд} = 0,25 \text{ см}^2/\text{г}$ и $S_{уд} = 0,12 \text{ см}^2/\text{г}$.

2. Оптимальная температура деструкции составляет 525°C , при которой выход жидкого полупродукта является максимальным. Это наиболее благоприятно для получения вторичного сырья с целью последующего производства высококачественного моторного или печного топлива.

3. Установлены аналитические зависимости выхода жидких продуктов пиролиза от температуры активации процесса деструкции шинной резины и выхода жидких продуктов пиролиза от времени деструкции шинной резины.

4. Аналитические зависимости позволяют определить важные параметры технологии рециклинга резинотехнических изделий, что дает возможность обоснованного подхода к проектированию установок пиролизической переработки изношенных автотракторных шин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сталинский, Д. В. Получение альтернативных видов топлива из резиносодержащих отходов [Текст] / Д. В. Сталинский, А. Л. Скоромный, А. М. Синозацкий // Экология и промышленность. – 2009. – № 2. – С. 53–58.
2. Твердые бытовые отходы. Технологии, оборудование. Проблемы и решения [Текст] / А. М. Касимов, В. Т. Семенов, А. М. Александров, А. М. Коваленко. – Харьков : ХНАГХ, 2006. – 301 с.
3. Утилизация отработанных автомобильных шин [Текст] / [Т. В. Петренко, Ю. А. Новичков, Е. И. Позднякова, В. В. Хазипова]. – Донецк : Цифровая типография, 2007. – 110 с.
4. Ярмольчик, Ю. П. Пиролиз: утилизация отходов [Текст] / Ю. П. Ярмольчик, И. В. Веженков // Энергосбережение. – 2012. – № 6. – С. 10–11.
5. Waste tyre pyrolysis – A review [Текст] / Juan Daniel Martnnez, Neus Puy, Ramyn Murillo [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – Vol. 23. – P. 17–213.

Получено 07.09.2017

Ю. О. НОВІЧКОВ

АНАЛІЗ КІЛЬКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ПРОДУКТІВ ПІРОЛІЗУ
ВІДПРАЦЬОВАНИХ АВТОТРАКТОРНИХ ШИН

ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

Анотація. Проведено аналіз кількісних показників виходу рідких та твердих продуктів низькотемпературного піролізу відпрацьованих шин. Визначені залежності виходу від часу проведення реакції, а також виходу від температури процесу. Аналітичні залежності дозволяють визначити важливі параметри технології рециклінгу гумовотехнічних виробів, що дає можливість обґрунтованого підходу до проектування установок піролітичної переробки зношених автотракторних шин.

Ключові слова: зношені автотракторні шини, піроліз, вторинні продукти, технологічний режим, аналітичні залежності, екологічна безпека.

YURII NOVICHKOV

ANALYSIS OF QUANTITATIVE INDEXES OF PYROLYSIS PRODUCTS OF
EXHAUST MOTOR-VEHICLE AND TRACTOR TIRES

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The analysis of quantitative indexes of output of liquid and hard products of low temperature pyrolysis of exhaust tires has been carried out. Analytical dependences of output are certain on time of reaction lead through, and also output from the process temperature. Analytical dependences allow determining the important parameters of rubber – technical wares recycling technology that enables the grounded going near planning of settings of threadbare motor-vehicle and tractor tires pyrolysis processing.

Key words: threadbare motor-car tires, pyrolysis, after products, output, technological mode, analytical dependences, ecological safety.

Новичков Юрий Александрович – старший преподаватель кафедры технической эксплуатации и сервиса автомобилей, технологических машин и оборудования ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: утилизация изношенных автомобильных шин.

Новічков Юрій Олександрович – старший викладач кафедри технічної експлуатації та сервісу автомобілів, технологічних машин та обладнання ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: утилізація зношених автомобільних шин.

Novichkov Yuri – senior lecturer, Technical Exploitation and Service of Automobiles, Technological Machines and Equipment Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: utilization of threadbare motor-car tires.

УДК 697.932

И. П. ЯЦКО, Н. А. МАКСИМОВА

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ, ИХ ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ

Аннотация. Рассмотрены основные виды солнечных коллекторов, сформулированы достоинства и недостатки использования плоских и вакуумных коллекторов солнечной энергии для теплоснабжения в индивидуальном жилищном строительстве.

Ключевые слова: солнечный коллектор, солнечное излучение, солнечная энергетика, плоский солнечный коллектор, вакуумный солнечный коллектор, КПД коллектора.

Солнечный коллектор для отопления – это один из самых распространенных и доступных альтернативных источников энергии для дома. Общую эффективность солнечного коллектора определяют значением КПД коллектора. Для определения значения КПД используем формулу [1]:

$$\eta = \eta_0 - \frac{k_1 \cdot \Delta T}{E} - \frac{k_2 \cdot \Delta T^2}{E},$$

где η – коэффициент полезного действия коллектора;
 η_0 – оптический коэффициент полезного действия;
 k_1, k_2 – коэффициенты тепловых потерь, Вт/(м²·К);
 ΔT – разница температур между коллектором и воздухом К;
 E – суммарная интенсивность солнечного излучения.

На рисунке 1 представлен график КПД коллекторов.

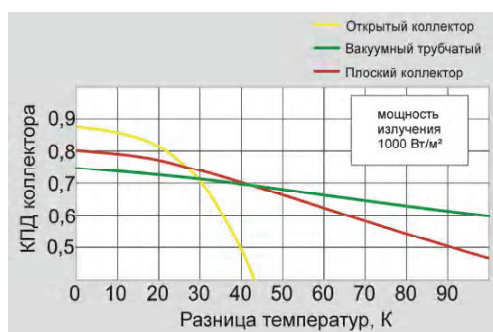


Рисунок 1 – График КПД коллекторов.

Солнечное излучение – это один из самых доступных и распространенных альтернативных источников тепла, а солнечные коллектора в свою очередь – самый простой способ эту энергию преобразовать.

На рисунке 2 представлена схема КПД использования солнечного излучения в коллекторе.

В данный момент распространены два вида коллекторов – **плоский** и **вакуумный** [1, 2]. Каждый из них имеет определенные достоинства и недостатки, которые сведены и представлены в таблице.

© И. П. Яцко, Н. А. Максимова, 2017

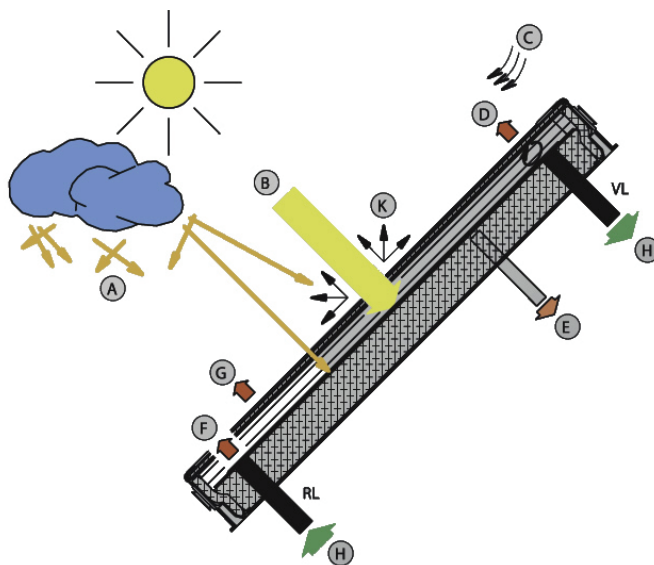


Рисунок 2 – КПД использования солнечного излучения в коллекторе: А – излучение, рассеянное в атмосфере; В – прямое солнечное излучение; С – ветер, дождь, снег; D – потери вследствие конвекции; E – потери вследствие теплопроводности; F – тепловое излучение абсорбера; G – тепловое излучение теплового стекла; H – полезная мощность коллектора; K – отражение.

Таблица – Достоинства и недостатки основных видов солнечных коллекторов

Устройство	Область применения	Достоинства	Недостатки
Плоский коллектор	В бытовых водонагревательных и отопительных системах	<ul style="list-style-type: none"> – большая площадь абсорбера; – низкая стоимость, простота изготовления; – возможность реализации режима принудительной оттайки выпавшего снега путем пропуска горячего теплоносителя через солнечный коллектор; – способность улавливать как прямую, так и рассеянную радиацию; – стоимость солнечной установки можно существенно уменьшить путем совмещения конструкции кровли с плоским солнечным коллектором. 	<ul style="list-style-type: none"> – хрупкость светопрозрачного листового покрытия; – низкий КПД при высоких температурах абсорбера; – возможность замерзания теплоносителя зимой; – коррозия [3]
Вакуумный коллектор	В бытовых водонагревательных и отопительных системах	<ul style="list-style-type: none"> – возможность замены отдельных трубок в случае поломки; – возможность поворачивать трубки вокруг своей оси для выбора наиболее оптимального угла по отношению к солнцу и обеспечение. – непосредственная передача тепла воде; – высокая рабочая температура; – высокий КПД; – способность улавливать как прямую, так и рассеянную радиацию; – отсутствие условий для коррозии. 	<ul style="list-style-type: none"> – хрупкость светопрозрачного листового покрытия; – небольшая площадь абсорбера; – высокая стоимость; – невозможность реализации режима принудительной оттайки выпавшего снега без внедрения дополнительных систем.

Первый, **плоский коллектор** является самым распространенным видом солнечных коллекторов, которые используются в бытовых водонагревательных и отопительных системах.

Плоский солнечный коллектор показан на рисунке 3.



Рисунок 3 – Конструкция плоского солнечного коллектора.

Коллектор представляет собой теплоизолированную остекленную панель, в которую помещена пластина поглотителя. В большинстве случаев пластина изготовлена из меди, потому что она лучше проводит тепло и меньше подвергается коррозии, чем алюминий. Чтобы лучше удерживать поглощенный солнечный свет, пластину поглотителя обрабатывают специальным покрытием, которое состоит из очень прочного тонкого слоя аморфного полупроводника, нанесенного на металлическое основание. Дно и боковые стенки коллектора покрывают теплоизолирующим материалом. В плоских коллекторах используется матовое стекло с низким содержанием железа. Благодаря остеклению снижаются потери тепла.

Солнечный свет проходит через остекление и попадает на поглощающую пластину, которая нагревается, превращая солнечную радиацию в тепловую энергию. Это тепло передается воде или антифризу, циркулирующему через солнечный коллектор. Теплоноситель нагревается и отдает тепловую энергию через теплообменник воде в емкостном водонагревателе. Применение плоского солнечного коллектора ограничено в периоды пониженной солнечной активности и в холодное время года. Основные недостатки приведены в таблице.

Второй, **вакуумный коллектор** состоит из так называемых тепловых трубок. Наружная часть такой трубки прозрачна, а на внутренней части трубки наносится высокоселективное покрытие, эффективно улавливающее солнечную энергию [6]. Между внешней и внутренней стеклянной трубкой находится вакуум. Внутри трубки находится низкокипящая жидкость или теплоноситель.

Вакуумный солнечный коллектор показан на рисунке 4.



Рисунок 4 – Конструкция вакуумного солнечного коллектора.

При облучении установки солнечным светом жидкость, находящаяся в нижней части трубки, нагреваясь, превращается в пар. Пары поднимаются в верхнюю часть трубки, где конденсируясь, отдают тепло коллектору. Благодаря цилиндрической форме трубок солнечные лучи падают на поверхность абсорбера перпендикулярно к оси трубки, но при этом все остальные лучи, не перпендикулярные оси трубки, будут отражаться (рисунок 5).

Основные достоинства и недостатки основных видов солнечных коллекторов сведены и представлены в таблице.

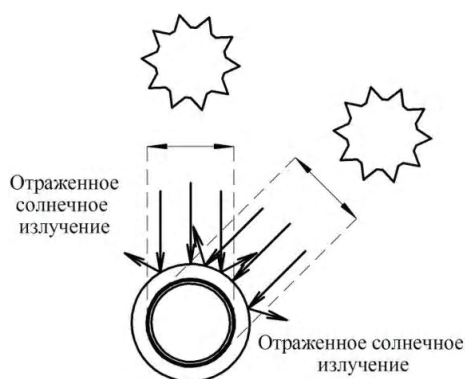


Рисунок 5 – Падение и отражение света от вакуумных трубок.

При выборе солнечного коллектора любой конструкции необходимо учитывать их отличия, стоимость, реальный КПД, область применения и климатические данные [4, 5, 6, 7] и экономический эффект от внедрения.

ВЫВОД

В статье проведен анализ основных видов солнечных коллекторов. На основании приведенных достоинств и недостатков наиболее удобным является применение вакуумных солнечных коллекторов. Они удобны в монтаже и обслуживании, так как при повреждении одной из трубок достаточно заменить только ее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алмаев, А. Ю. Использование солнечной энергии для теплоснабжения систем горячего водоснабжения в индивидуальном жилищном строительстве [Текст] / А. Ю. Алмаев, И. А. Лушкин // Вестник НГИЭИ. – 2014. – № 12 (43). – С. 5–9.
2. Белова, Е. М. Центральные системы кондиционирования воздуха в зданиях [Текст] / Е. М. Белова. – М. : Евроклимат, 2006. – 640 с.
3. Анциферов, С. А. Влияние нефтепродуктов на коррозионную активность грунта [Текст] / С. А. Анциферов, В. М. Филенков // Вестник НГИЭИ. – 2014. – № 12 (43). – С. 9–13.
4. Петросян, А. Л. Использование солнечной энергии и тепловых насосов для теплоснабжения жилых зданий [Текст] / А. Л. Петросян // Сб. научн. трудов. Ереванского гос. университета архитектуры и строительства. – 2003. – Том II. – С. 122–124.
5. Щукина, Т. В. Научно-методологические основы использования солнечной энергии в замещении тепловых нагрузок зданий [Текст] : диссертация ... доктора технических наук : 05.23.03 / Щукина Татьяна Васильевна. – Москва, 2011. – 281 с.
6. Кучеренко, М. Н. Термодинамическое обоснование графоаналитического решения задачи влагопереноса в слое биологически активной продукции [Текст] : дис. ... канд. тех. наук : 05.23.03 / Кучеренко Мария Николаевна. – Н. Новгород, 2005. – 134 с.

Получено 08.09.2017

І. П. ЯЦКО, Н. А. МАКСИМОВА
ОСНОВНІ ВИДИ СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ, ЇХ ПЕРЕВАГИ І НЕДОЛІКИ
ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

Анотація. Розглянуто основні види сонячних колекторів, сформульовані переваги і недоліки використання плоских і вакуумних колекторів сонячної енергії для теплопостачання в індивідуальному житловому будівництві.

Ключові слова: сонячний колектор, сонячне випромінювання, сонячна енергетика, плоский сонячний колектор, вакуумний сонячний колектор, ККД колектора.

ILYA YATSKO, NATALYA MAKSIMOVA
THE MAIN TYPES OF SOLAR COLLECTORS, THEIR ADVANTAGES AND
DISADVANTAGES

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The main types of solar collectors have been considered, advantages and disadvantages of using flat and vacuum solar collectors for heat supply in individual housing construction have been formulated.

Key words: solar collector, solar radiation, solar energy, flat solar collector, vacuum solar collector, collector efficiency.

Яцко Ілля Петрович – магістрант кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ГОУ ВПО «Донбасська національна академія будівництва та архітектури». Научні інтереси: колектори сонячної енергії для теплопостачання в індивідуальному житловому будівництві.

Максимова Наталія Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ГОУ ВПО «Донбасська національна академія будівництва та архітектури». Научні інтереси: розробка термотрансформаторів і теплових насосів, енергоресурсозбереження в системах вентиляції та кондиціонування повітря.

Яцко Ілля Петрович – магістрант кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: колектори сонячної енергії для теплопостачання в індивідуальному житловому будівництві.

Максимова Наталя Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: розробка термотрансформаторів і теплових насосів, енергоресурсозбереження в системах вентиляції і кондиціонування повітря.

Yatsko Ilya – master's student, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: collectors of solar energy for heat supply in individual housing construction.

Maksimova Natalya – Ph. D. (Eng), Associate Professor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: thermo transformers and thermo compressors development, energy and resource saving in ventilation and air conditioning systems.

УДК 66.071.9

Б. В. КЛЯУС, Д. В. ВЫБОРНОВ, Д. В. САВИЧ

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

АНАЛИЗ ТЕПЛОВОГО ПОТЕНЦИАЛА УХОДЯЩИХ ГАЗОВ ПРОИЗВОДСТВА ОГНЕУПОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Аннотация. В данной статье рассмотрены характеристики запыленных газовых потоков от обжига различного сырья в производстве огнеупорной промышленности, определяющим образом влияющих на тепловой потенциал и состав уходящих газов. Выполнен анализ состава и качества уходящих газов данного вида производства.

Ключевые слова: огнеупорная промышленность, тепловое загрязнение, запыленный газовый поток, тепловой потенциал.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Постоянная интенсификация производственной деятельности человека, сопряженная с тепловыми выбросами, приводит к изменению химического состава и физических свойств грунтовых и подземных вод, а также поверхностного водостока, структуры почв, усилению геохимических процессов, изменению всего ландшафта. Неразумное использование природных ресурсов приводит к загрязнению и изменению биосферы [1].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

На сегодняшний день научно-технический прогресс на своей стадии развития достиг огромного потенциала для повышения комфортности и качества жизни человека. Тем не менее он также создал угрозу существованию человека и всего живого на Земле из-за нарушения естественного круговорота веществ в биосфере сложившихся в ходе эволюции процессов обмена веществом, энергией, информацией в биогеоценозах. По данным Всемирной организации здравоохранения, в настоящее время используется более 500 000 различных химических соединений, из которых около 40 000 имеют вредные для человека свойства, а 12 000 токсичны. В биосферу Земли ежегодно поступает более 30 млрд т промышленных и бытовых отходов [1]. Многими авторами [2–4] рассматривались проблемы неэффективного использования теплоты уходящих газов на обжиговых производствах, однако предложенный материал не дает возможности оценить в достаточной мере полный тепловой потенциал данных мероприятий. При этом выдвигались интересные решения, к примеру разместить оборудование для глубокой утилизации тепла продуктов сгорания при их движении между сушильным барабаном и электрофильтром. В виду того, что остатки водяных паров, содержащихся в дымовых газах, после утилизации способны продолжать конденсироваться на стенках газоотводящих каналов, тягодутьевого оборудования и дымовой трубы, а следовательно – и в электрофильтре, рекомендуется поддерживать температуру дымовых газов за теплоутилизатором выше температуры точки росы путём байпасирования или подмешиванием горячего воздуха из холодильной установки [2].

ЦЕЛЬ

Целью данной статьи является анализ теплового потенциала выбросов запыленных дымовых газов от теплотехнологического оборудования производства огнеупорной промышленности для его реализации в энергосберегающих мероприятиях в виде глубокой утилизации теплоты водяных паров.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Высокотемпературные процессы лежат в основе производств строительных и других материалов. Данные процессы совершаются в промышленных печах, в которых материалам придаются свойства, требуемые для конечного продукта или необходимые для дальнейшей обработки. В печах для тепловой обработки материалов одновременно протекает ряд сложных процессов: газификация и горение топлива, движение дымовых газов в рабочем пространстве, передача тепла от горящего факела и дымовых газов к обрабатываемому материалу (непосредственно или посредством вторичного излучателя – кладки), продвижение теплового потока от поверхности изделий внутрь, экзотермические и эндотермические процессы при изменении свойств обрабатываемого материала и т. д. Все эти сложные процессы взаимно связаны, их совокупность составляет суммарный процесс тепловой обработки [5].

Вся производственная пыль и большая часть дымовых газов, обладающих высокой температурой, выносимых из печей производства огнеупорной промышленности, являются частью обрабатываемого сырья или уже готового продукта. Поэтому анализ их состава является важной ступенью перед тем, как улавливать вредные вещества и возвращать в технологический процесс. Улавливание твердых и отдельных газообразных составляющих дымовых газов является обязательным по условиям создания нормальных санитарно-гигиенических условий как в цехе, так и в районе размещения предприятия. Помимо этого, печи, как и все другие теплотехнологические агрегаты, являются источниками теплового загрязнения биосферы. Например, при производстве цементного клинкера во вращающихся печах потери теплоты достигают порядка 600...650 кДж на килограмм готовой продукции [6].

Содержание пыли в газах, выбрасываемых в атмосферу, по нормам различных стран колеблется от 80 до 1 000 мг/м³. Независимо от вида обрабатываемого сырья в печи вся пыль, которая содержится в обрабатываемом материале и размер частиц которой меньше критического, при своем движении по печи захватывается газом и вместе с ним поступает в обрабатываемую зону, где частично задерживается, частично же выносится из печи [6].

Проведём анализ данных выбросов запыленных дымовых газов на примере технологического процесса вращающихся печей производства огнеупорной промышленности. Вращающиеся печи относятся к наиболее высокопроизводительным и механизированным печным агрегатам для обжига глины, доломита, магнезита и известняка с целью изменения их физико-химических свойств [7]. На территории Донбасса располагаются три крупнейших предприятия по производству огнеупорных изделий:

- ПАО «Часовоярский огнеупорный комбинат» с максимальной годовой мощностью предприятия – 314,246 тыс. т огнеупоров, 38 тыс. т огнеупорных материалов, 800 тыс. т формовочных песков;
- ПАО «Великоанадольский огнеупорный комбинат», в состав которого входят 2 огнеупорных цеха производительностью свыше 300 тыс. т в год;
- ОАО «Пантелеймоновский огнеупорный завод» с ежегодной мощностью оборудования, составляющей 50 тыс. т.

Вращающаяся печь представляет собой длинный барабан, его устанавливают под небольшим углом к горизонту 3...50, вращающийся со скоростью 0,5...1,2 об./мин. В верхний холодный конец барабана, входящий в пылевую камеру, подается обжигаемый материал. Нижний горячий конец барабана входит в откатную головку, через которую в печь подается природный газ. Обоженный материал через щели откатной головки поступает в холодильник. Барабан печи делают сварным или клепаным из листовой стали толщиной 15...40 мм, диаметром 2,0...5,0 м, длиной от 40 до 185 м. Внутреннюю поверхность печи футеруют огнеупорным кирпичом. Для улучшения условий теплопередачи в печи встраивают различные теплообменные устройства типа перегревающих лопастей. С этой же целью футеровку печей выполняют сложной формы, например ячеистой. Пример схемы конструкции печи приведен на рис. 1.

В результате производства огнеупоров в промышленных печах образуются большие объёмы дымовых газов, включающих в себя оксиды углерода и азота, а также пыль от обрабатываемого сырья. Объём каждого компонента дымовых газов зависит от эффективности работы печи, вида применяемого топлива и характеристики изготавливаемого продукта, способа обжига сырья (сухой или мокрый) [8]. В табл. 1 [6] указаны объёмы дымовых газов от обжига различных материалов, а также количество и приблизительный фракционный состав уносимой ими пыли.

При освоении технологии очистки отходящих пылегазовых систем и оценке теплового потенциала уходящих газов важно знать основные свойства пыли, к которым можно отнести: химический

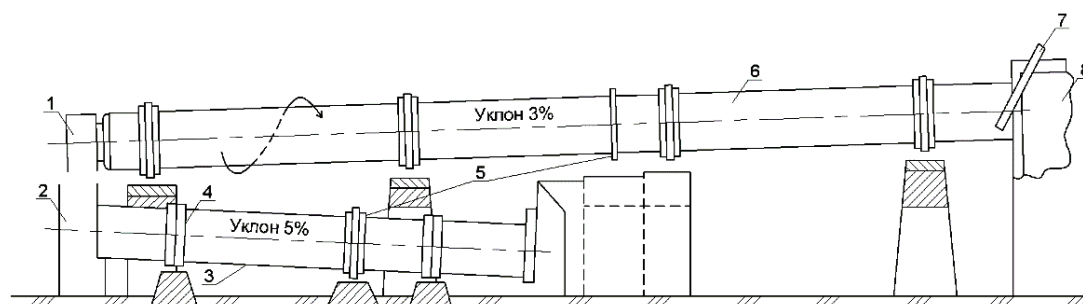


Рисунок 1 – Схема вращающейся печи: 1 – головка; 2 – горячая камера; 3 – холодильник; 4 – бандаж; 5 – шестерня; 6 – печь; 7 – течка; 8 – холодная камера.

Таблица 1 – Характеристика запыленности дымовых газов

Обрабатываемое в печи сырье	Размеры печи, мм	Количество образующихся дымовых газов, м ³ /с	Фракции образующейся пыли, мкм	Количество выносимой пыли		Запыленность дымовых газов, г/м ³
				кг/т	кг/ч	
Магнезит	170×4,5	51	0–60	145	7 000	120
	90×3,6	24		190	6 000	104
Доломит	90×3,6	36	5–25	170	5 500	90
Глина	65×2,5	14	–	75	800	36
Известняк	60×2,5	12	0–45	83	1 200	44

состав, плотность, абразивность, угол естественного откоса, слипаемость, смачиваемость, удельное электрическое сопротивление, дисперсность, токсичность, воспламеняемость и взрываемость, адгезионные свойства. Состав пыли в газах, при обжиге, определяется в основном составом исходных сырьевых компонентов материалов и зависит от технологических процессов производства. Рассмотрим характеристики ряда пылей, образующихся при производстве огнеупорных материалов [9]. Химические составы пылей в газах, образующихся в процессе обжига материалов, представлены в табл. 2. Следует обратить внимание на наличие оксидов натрия и калия Na_2O , K_2O , присутствие которых в водных растворах понижают поверхностное натяжение последних [3]. Физико-механические свойства пылей представлены в табл. 3.

Таблица 2 – Химический состав огнеупорных материалов, %

Материал	SiO_2	TiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	Потери при прокаливании
Глина Часов-Ярского месторождения	51,9	1,37	0,9	33,32	0,53	0,57	0,69	2,59	–	8,42
Доломит Щелковского месторождения	3,4	–	1,8	0,7	39	30,5	0,2	0,5	2,2	12,2
Известняк Студеновского месторождения	7	–	4,5	2,9	66,8	2,34	0,3	2,5	4,9	8,1
Магнезит	1,1	–	1,6	0,5	1,3	78,9	2,9	2,9	6,0	7,7

Исходя из характеристик, приведенных выше в таблицах, можно сделать вывод о том, что пыль выбросов производства огнеупорной промышленности, в частности глины и магнезита, сильнослипающаяся, что определяет эксплуатационную надежность работы пылеуловителя, а именно полное

Таблица 3 – Физико-механические свойства пылей

Физико-механические свойства пыли	Размерность	Глина Часов-Ярского месторождения	Доломит Щелковского месторождения	Известняк Студеновского месторождения	Магнезит
Плотность	кг/м ³	2 670	2 960	2 700	2 750
Угол естественного откоса	град	37	36	40	50
Слипаемость	Па	более 600	116	178	526
Смачиваемость	%	образует коллоидный раствор	99	99	85,6
Удельное электрическое сопротивление	Ом·м	1,3·10 ⁸	3·10 ⁶	1,8·10 ⁸	1,3·10 ⁸
Температура пылегазового потока	°С	150	250	150	190

или частичное забивание аппаратов осажженной пылью. По удельному электрическому сопротивлению и характеру влияния на эффективность электрофильтров пыль огнеупорного производства – эффективно осаждается в электрофильтрах. По результатам промышленных экспериментов методом пленочной флотации все пыли строительного производства относятся к среднесмачиваемым (поглощают до 80 % влаги) и хорошо смачиваемым (80...100 % влаги), что в свою очередь дает возможность применять мокрый способ очистки. Следовательно, при утилизации теплоты проблемы запыленности потока следует решать путем применения электрофильтров или аппаратов, работающих по мокрому способу очистки.

Температура пылегазового потока характеризует уходящие газы, содержащие в своём объёме пыль от процесса обжига перед пылеулавливающим оборудованием, а также показывает потенциал утилизации теплоты, что равным образом снизит нагрузку на это оборудование. Температура дымовых газов на выходе из печи составляет порядка 200...500 °С в зависимости от обжигаемого материала и реализуемого технологического процесса. В зависимости от объемов дымовых газов, образующихся при процессе обжига, а также их температур перед пылеулавливающим оборудованием существует потенциал использования технологии глубокой утилизации теплоты. В табл. 4 представлен тепловой потенциал, который может быть полезно использован при конденсации водяных паров уходящих газов.

Таблица 4 – Потенциал использования глубокой утилизации теплоты дымовых газов

Обжигаемый материал	Количество образующихся дымовых газов, м ³ /ч	Температура пылегазового потока до утилизации, t,°C	Температура пылегазового потока после утилизации, t,°C	Потенциал для тепловой утилизации, кДж
Глина	50 400	150	50	840...3 500
Доломит	129 600	250		1 680...7 000
Известняк	43 200	150		840...3 500
Магнезит	86 400	190		1 200...4 900
	183 600			

ВЫВОДЫ

Рассмотренные выше характеристики запыленных газовых потоков от технологических процессов производства огнеупорной промышленности указывают на то, что необходимо уделять должное внимание в вопросе очистки уходящих газов в виду большого содержания вредных веществ, как газообразных, так и твёрдых. Расчетно-аналитические исследования позволяют сделать вывод о существенном, до 7 МДж, тепловом потенциале для применения теплоутилизационного оборудования с конденсацией водяных паров, содержащихся в дымовых газах в рамках энергосберегающих мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Введение в защиту окружающей среды [Текст] / В. Ф. Панин, С. В. Романенко, А. А. Сечин, А. И. Сечин. – Т. : Изд. ТПУ, 2011. – 175 с.
2. Савич, Д. В. Очистка и утилизация теплоты дымовых газов на Часовоярском огнеупорном комбинате [Текст] / Д. В. Савич // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2013. – Вып. 2013-5(103). – С. 36–40.
3. Удовиченко, З. В. Исследование характеристик отходящих газов сушильных барабанов Часовоярского огнеупорного комбината [Текст] / З. В. Удовиченко, Д. В. Савич // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2014. – Вып. 2014-3(107). – С. 37–40.
4. Kiosov, A. D. Deep recovering and storing of the heat of flue gases from boilers [Текст] / A. D. Kiosov, G. D. Avruts-kii // Thermal Engineering (Teploenergetika). – 2011. – Volume 58, Issue 11. – P. 948–952.
5. Щукин, А. А. Промышленные печи и газовое хозяйство заводов [Текст] / А. А. Щукин. – М. : Энергия, 1973. – 224 с.
6. Лисиенко, В. Г. Вращающиеся печи теплотехника, управление и экология [Текст]. Книга 2 / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев. – М. : Теплотехник, 2004. – 588 с.
7. Лисиенко, В. Г. Вращающиеся печи теплотехника, управление и экология [Текст]. Книга 1 / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев. – М. : Теплотехник, 2004. – 687 с.
8. Долина, Л. Ф. Техноэкология для строителей [Текст] / Л. Ф. Долина. – Д. : Континент, 2006. – 256 с.
9. Тимонин, А. С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования [Текст] : Справочник. Том 1 / А. С. Тимонин. – К. : Изд. Н. Бочкаревой, 2003. – 914 с.

Получено 09.09.2017

Б. В. КЛЯУС, Д. В. ВИБОРНОВ, Д. В. САВИЧ
АНАЛІЗ ТЕПЛОВОГО ПОТЕНЦІАЛУ ГАЗІВ ВИРОБНИЦТВА
ВОГНЕТРИВКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ
ДОНБАСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

Анотація. У даній статті розглянуті характеристики запиленних газових потоків від випалювання різноманітної сировини у виробництві вогнетривкої промисловості, що визначальним чином впливають на тепловий потенціал і склад газів. Виконано аналіз складу і якості відхідних газів даного виду виробництва.

Ключові слова: вогнетривка промисловість, потепління, запилений газовий потік, тепловий потенціал.

BOGDAN KLYAUS, DMITRY VYBORNOV, DARYA SAVICH
ANALYSIS OF THE HEAT POTENTIAL OF THE EXHAUST GASES PRODUCED
BY THE REFRACTORY INDUSTRY
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The characteristics of dusty gas flows from roasting of various raw materials in the production of the refractory industry, which affect the thermal potential and composition of the exhaust gases, have been considered in this article. The composition and quality of the exhaust gases of this type of production has been analyzed.

Key words: refractory industry, warming, dusty gas flow, thermal potential.

Кляус Богдан Валентинович – магистрант кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергоресурсосбережение в системах теплогазоснабжения.

Выборнов Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергосбережение в системах теплоснабжения, использование теплонасосных технологий.

Савич Дарья Владимировна – ассистент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергосберегающие технологии.

Кляус Богдан Валентинович – магістрант кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергоресурсозбереження в системах теплогазопостачання.

Виборнов Дмитро Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергозбереження в системах теплопостачання, використання теплонасосних технологій.

Савич Дар'я Володимирівна – асистент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергоощадні технології.

Klyaus Bogdan – master's student, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: energy and resource saving in heat and gas supply systems.

Vybornov Dmitry – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: heat saving in systems of a heat supply with usage of heat pumps technologies.

Savich Darya – assistant, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: energy saving technology.

УДК 620.179.13

А. В. ПЛУЖНИК, Д. В. ВЫБОРНОВ

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ КАК ВИД МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТОВ ТГВ

Аннотация. В данной статье описано назначение теплового контроля и его преимущества по сравнению с другими методами. Рассмотрены пассивный и активный виды контроля. На основании этого составлена функциональная схема теплового контроля. Проанализированы способы, позволяющие построить алгоритмы и математические модели для нахождения коэффициента температуропроводности изоляционных материалов, а также исследования по учету погрешностей при обработке результатов активного контроля.

Ключевые слова: тепловой контроль, активный метод, тепловизор, систематическая погрешность.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Строительство новых объектов и проведение реконструкции уже эксплуатируемых с учетом требований энергосбережения достигается лишь при должном качестве проектирования и производства, использовании современных средств и технологий, а также своевременного и обязательного контроля состояния новостроящихся, эксплуатируемых и реконструируемых объектов. Следовательно, необходимо использовать методы и средства, позволяющие обнаружить дефекты на начальной стадии развития, что позволит снизить затраты на ремонт.

За последнее время было разработано значительное количество методов и средств, при соответствующей разработке которых можно добиться качественных удельных показателей энергосбережения исследуемых объектов. Ярким примером является проведение теплового контроля и определение действительных теплотехнических характеристик исследуемых объектов в условиях их эксплуатации.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Основным путем реализации теплового метода контроля является создание средств, обеспечивающих преобразование температурного градиента или инфракрасного излучения в видимое изображение, которое позволяет получить и обработать информацию об объекте исследования. Широкие возможности теплового метода контроля позволяют, в отличие от других видов контроля, выявить как внутренние, так и наружные дефекты, в случае, если оборудование скрыто под слоем изоляции или защитным кожухом, обследовать объект на большом расстоянии [1].

Тепловой контроль может использоваться как для качественного, так и количественного метода. Некоторые задачи такого контроля не требуют получения точных температур поверхности. Этот метод качественного визуального контроля целесообразен для сбора большого количества данных и их обработки. Тогда как точный количественный метод требует более точного анализа для интерпретации температурной картины из полученных тепловых изображений. Однако это чревато получением больших массивов данных с высоким разрешением, которые сложны в обработке и требуют значительных затрат времени [2].

ЦЕЛЬ

Рассмотреть и проанализировать применение различных средств метода теплового контроля применительно к мониторингу состояния оборудования и систем ТГВ с последующими рекомендациями по термомодернизации.

© А. В. Плужник, Д. В. Выборнов, 2017

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Тепловой контроль проводят в целях выявления дефектов и определения их параметров для оценки качества и соответствия контролируемых объектов требованиям нормативной технической документации. Тепловой контроль включает следующие этапы: анализ конструкторской и технологической документации; определение количественных значений температуры в точках поверхности контролируемого объекта; определение дополнительных характеристик состояния поверхности и окружающей среды; качественный и количественный анализ температурных полей на исследуемой поверхности; выявление зон с аномальной температурой, обусловленной наличием дефектов в контролируемом объекте; расчет на базе произведенных измерений теплотехнических параметров объектов контроля и сопоставление их с нормативными значениями; определение параметров дефектов; оценку качества объектов контроля [3].

Достоинствами применения такого метода являются: диагностика на расстоянии от объекта; высокая скорость получения данных об объекте; высокая производительность проведения испытаний; контроль изделий из любых материалов; возможность сочетания с другими видами контроля; совместимость со стандартными системами обработки информации; возможность создания автоматической системы управления.

Различают два вида теплового контроля – активный и пассивный. На рисунке представлена функциональная схема теплового контроля [4]. Активный и пассивный тепловой контроль широко применяются во многих отраслях промышленности. Пассивный метод теплового контроля является наиболее распространенным методом и основан на возникновении температурного поля объекта при эксплуатации или изготовлении. Преимуществом такого метода является возможность его использования без остановки технологического процесса и дополнительного нагрева объекта. Пассивный метод обычно используется для строительных конструкций, различного оборудования и т. п. В качестве измерительных приборов выступают тепловизоры, пирометры, измерители тепловых потоков и логгеры данных (регистраторы, позволяющие выполнять большое количество задач).

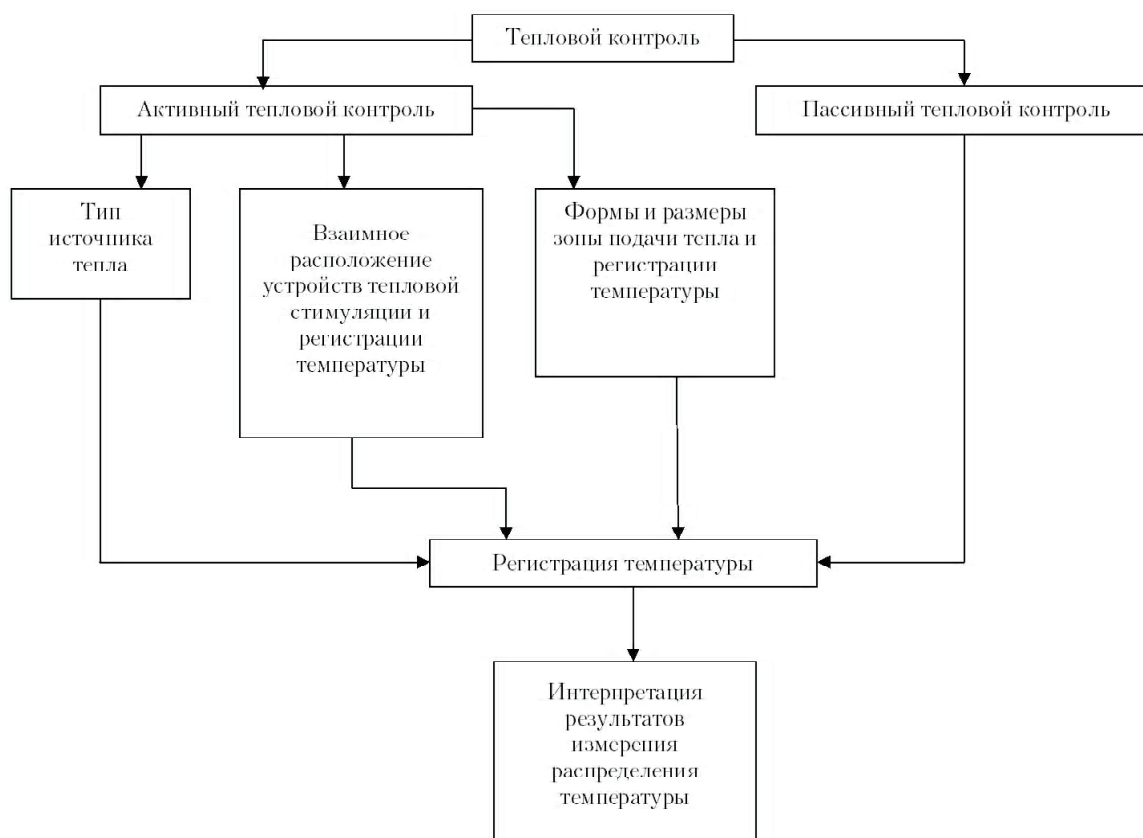


Рисунок – Функциональная схема теплового контроля.

Активный метод применяют в случае, если исследуемый объект не выделяет достаточно теплового излучения для проведения теплового контроля. При таком методе объект нагревается внешним источником. Объекты, контролируемые данным методом, – это многослойные композитные материалы и другие изделия, требующие внешней тепловой нагрузки [4].

В зависимости от способа измерения температуры приборы теплового контроля разделяют на контактные и бесконтактные. В настоящее время наиболее распространенными приборами для контактного измерения температуры являются: термопары, металлические и полупроводниковые сопротивления, термоиндикаторы, термокарандаши, манометрические и жидкостные термометры. К бесконтактным приборам теплового контроля относятся: тепловизоры, термографы, квантовые счетчики, радиационные пирометры и др.

Среди приборов теплового контроля самыми востребованными в настоящее время являются тепловизоры. Доля задач теплового контроля, решаемая с помощью тепловизоров, настолько велика, что часто употребляется термин «тепловизионный контроль».

С помощью тепловизоров реализуются методы контроля процессов обмена тепла в выхлопных системах, двигателях и радиаторах автомобиля, при ультразвуковой сварке, проверке изоляции, выявлении потерь тепла в помещениях, диагностике конструкций ограждений, выявлении утечки газа из газопровода, контроле технологических процессов, анализе работоспособности тепловых трасс, выявлении мест подсоса холодного воздуха.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что использование тепловизора имеет как практический, так и аналитический потенциал исследований. Следует отметить работы А. Б. Власова, который рассматривает применение теплового контроля и описывает математические модели и методы контроля [5]. Представленные методы показывают возможности тепловизионной диагностики в активном тепловом режиме для измерения теплофизических параметров электроизоляционных материалов, а также изделий на их основе непосредственно в процессе эксплуатации. Полученные данные позволяют оценить скорость распространения теплового потока через электроизоляционные материалы, характеризующиеся малыми значениями коэффициента температуропроводности, а также время протекания переходных процессов в аппаратах [6].

Результаты исследования по определению теплофизических свойств теплоизолирующих материалов описаны А. В. Вавиловым [7]. Особенностью данного метода является определение температуропроводности, основанной на применении преобразования Фурье (это разложение исходной непрерывной функции от времени на совокупность базисных гармонических функций различной частоты, амплитуды и фазы).

Следует отметить, кроме прочего, что к недостаткам тепловизионного обследования относят периодическое появление системной ошибки, возникающей в результате погрешности оборудования. Однако данные неточности в определении плотности теплового потока и температуры наружных ограждений могут быть учтены в процессе обработки данных [8, 9]:

$$\frac{\Delta W}{W} = \sqrt{\left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{T_{\text{нар.п.}}}{T_{\text{нар.п.}} + T_{\text{нар.в.}}}\right)^2},$$

где $\Delta W, \Delta Q$ – отклонения в измерении теплопотерь и теплового потока соответственно, Вт;
 W, Q – прогнозируемые теплопотери и тепловой поток соответственно, Вт;
 $T_{\text{нар.п.}}, T_{\text{нар.в.}}$ – температура наружной поверхности и наружного воздуха соответственно.

Исследования [7–9] показывают, что отклонения при измерении температуры тепловизионным методом достигают 1...3 °С, что может быть приемлемым в определенных случаях диагностики объектов строительства и систем теплоснабжения.

ВЫВОДЫ

Тепловой контроль имеет широкий спектр применения в энергетике, а также является эффективным средством качественного и количественного контроля, при котором предоставляется вся необходимая информация об исследуемом объекте. Современные технологии позволяют использовать разработанные математические модели и алгоритмы для обработки полученных результатов, что дает возможность развития и применения методов теплового контроля в объектах ТГВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалев, А. В. Тепловидение сегодня [Текст] / А. В. Ковалев, В. Г. Федчишин, М. И. Щербаков // Специальная техника. – 1999. – Вып. № 3. – С. 13–18.
2. Griffith, B. Infrared thermographic systems [Текст] / Brent Griffith, Daniel Tyler, Howdy Goudey // The encyclopedia of imaging science and technology / Joseph P. Hornak, Editor-in-Chief. – Berkeley, CA : Lawrence Berkeley National Laboratory, 2001. – P. 55–58.
3. Методические рекомендации о порядке проведения теплового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах [Текст] : РД-13-04-2006 / [принимали участие : Н. Н. Коновалов и др.]. – Москва : НТЦ «Промышленная безопасность», 2007. – 28 с. – (Серия 28, Неразрушающий контроль / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору; Вып. 11). – ISBN 978-5-93586-474-3.
4. Вавилов, В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль [Текст] / В. П. Вавилов. – М. : Спектр, 2009. – 562 с.
5. Власов, А. Б. Модели и методы термографической диагностики объектов энергетики [Текст] / А. Б. Власов. – М. : Колос, 2006. – 280 с.
6. Власов, А. Б. Исследование коэффициента температуропроводности электроизоляционных материалов с помощью тепловизора [Текст] / А. Б. Власов // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. – 2004. – Вып. 8. – С. 20–23.
7. Вавилов, В. П. Тепловой неразрушающий контроль в Томском НИИ интроскопии [Текст] / В. П. Вавилов // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Вып. № 1. – С. 24–27.
8. Вавилов, В. П. Пессимистический аспект тепловизионного энергоаудита строительных сооружений [Текст] / В. П. Вавилов // Дефектоскопия. – 2010. – Вып. 12. – С. 49–54.
9. Вавилов, В. П. Методические погрешности тепловизионного энергоаудита строительных сооружений [Текст] / В. П. Вавилов, И. А. Лариошина // Вестник науки Сибири. – 2012. – Вып. № 5(6). – С. 49–53.

Получено 10.09.2017

А. В. ПЛУЖНИК, Д. В. ВИБОРНОВ
ТЕПЛОВИЙ КОНТРОЛЬ ЯК ВИД МОНІТОРИНГУ ОБ'ЄКТІВ ТГВ
ДОНБАСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

Анотація. У даній статті описано призначення теплового контролю і його переваги в порівнянні з іншими методами. Розглянуто пасивний і активний види контролю. На підставі цього складена функціональна схема теплового контролю. Проаналізовано способи, що дозволяють побудувати алгоритми і математичні моделі для знаходження коефіцієнта температуропровідності ізоляційних матеріалів, а так само дослідження з обліку похибок при опрацюванні результатів активного контролю.

Ключові слова: тепловий контроль, активний метод, тепловізор, систематична похибка.

ANASTASIA PLUZHNIK, DMITRY VYBORN OV
THERMAL MONITORING AS A TYPE OF MONITORING OF DVT
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The purpose of thermal control and its advantages in comparison with other methods have been given in this article. Passive and active types of control have been considered. Based on this functional block diagram has been composed of thermal control. The methods allowing constructing algorithms and mathematical models for finding the coefficient of thermal diffusivity of insulating materials, as well as studies on the errors in the processing of results of active monitoring, have been analyzed.

Key words: thermal control, active method, thermal imager, systematic error.

Плужник Анастасія Вадимівна – магістрант кафедри теплотехники, теплогазоснабження і вентиляції ГОУ ВПО «Донбасська національна академія будівництва і архітектури». Научные интересы: энергосбережение, повышение надежности объектов теплоснабжения.

Выборнов Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергосбережение в системах теплоснабжения, использование теплонасосных технологий.

Плужник Анастасія Вадимівна – магістрант кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергозбереження, підвищення довговічності об'єктів теплопостачання.

Выборнов Дмитро Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергозбереження в системах теплопостачання, використання теплонасосних технологій.

Pluzhnik Anastasia – master's student, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: energy saving, increasing the longevity of heat supply facilities.

Vybornov Dmitry – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: heat saving in systems of a heat supply with usage of heat pumps technologies.

УДК 628.3:628.512

О. Л. ДАРИЕНКО

Автомобильно-дорожный институт ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ ГАЗОВ ТЕПЛОВЫХ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ОТ ДИОКСИДА СЕРЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ЭЛЕКТРОДИАЛИЗНОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

Аннотация. Предложено использование электродиализной установки для обработки минерализованной воды с целью совершенствования процесса десульфуризации отходящих газов теплоэлектростанций. Разработаны принципиальные двух- и трехконтурные схемы работы электродиализной установки с применением анионитовых, катионитовых и биполярных мембран, позволяющих повысить эффективность процесса обработки минерализованной воды с целью ее дальнейшего использования в процессе десульфуризации. Выведены расчетно-аналитические зависимости удельных затрат электроэнергии на процесс обработки воды от трех параметров: плотности тока, скорости потока и исходного солесодержания обрабатываемой воды.

Ключевые слова: десульфуризация, электродиализатор, накипеобразование, карбонатный индекс, плотность тока, обессоливание.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Большая часть от общего объема производства электроэнергии генерируется на тепловых электростанциях (ТЭС), значительная часть энергоблоков которых физически и морально устарели и выработали свой ресурс. Среди проблем тепловой энергетики стоит отметить низкую эффективность, износ и моральное старение оборудования. Текущее состояние вводит энергетику в зону технологических отказов, увеличения себестоимости электроэнергии, удельных расходов топлива и достаточно серьезных экологических рисков.

Возможность экономически обоснованного использования природного газа на тепловых электростанциях позволяла искусственно снизить антропогенную нагрузку за счет совместного сжигания угля и природного газа. Изменение конъюнктуры на рынке углеводородного сырья отразилось на увеличении цены природного газа, что привело к завершению «газовой паузы» и увеличению доли сжигаемого угля на отечественных ТЭС, актуализируя проблемы природоохранной деятельности в теплоэнергетическом комплексе [1].

Отечественные ТЭС предусматривают использование двух типов угля – антрацит (марки А и Т) и газовый (марка Г), сжигание которых связано с образованием оксидов серы, конверсия которых составляет обычно до 5 %. Содержание серы в углях различной группы достаточно велико: для антрацитовой группы – около 2,4 %, для газовой группы – 4,2 %. При сжигании этих углей в атмосферу выбрасывается значительное количество оксидов серы [2].

Наиболее эффективными методами деульфуризации, позволяющими сократить эмиссию диоксида серы до 90 %, являются «мокрые» технологии газоочистки с использованием кальций содержащих сорбентов. При этом стоит отметить, что наличие последних в поглотительном растворе и высокотемпературный режим сжигания топлива являются причиной накипеобразования, повышения интенсивности коррозионных процессов и сброса засоленных стоков в поверхностные водоемы.

Образование отложений приводит к ряду серьезных последствий, затрудняющих нормальный режим эксплуатации ТЭС. В частности, отложение карбонатной накипи на оросителях градирен снижает охлаждающий эффект градирни и может привести к разрушению оросителей. Такая авария имела место на Зуевской ТЭС.

ЦЕЛЬ

Существующие проблемы обусловили выбор цели настоящего исследования, которая заключается в поиске путей совершенствования системы очистки газовых выбросов тепловых электростанций от диоксида серы.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Как было сказано выше, наиболее распространенной технологией сероочистки в мировой практике является очистка дымовых газов в сероулавливающих (десульфуризационных) установках. По причине значительной эколого-экономической эффективности предпочтение отдается мокрому методу сероочистки. Их реализация связана с использованием доступных ингредиентов (известь, известняк, вода). В качестве отходов образуется гипс, который может быть использован в виде товарного продукта. Кроме того, использование этих методов позволяет максимально снизить эмиссию оксидов серы.

Реализация «мокрых» методов десульфуризации дымовых газов связана с нейтрализацией сернистой кислоты, которая образуется при взаимодействии диоксида серы, содержащегося в дымовых газах, с гидратом оксида кальция $Ca(OH)_2$ (известью) или карбонатом кальция $CaCO_3$ (известняком). Несмотря на то, что известь является достаточно дорогостоящим сырьем, ее использование в качестве сорбента позволяет вдвое уменьшить расход реагента и электроэнергии на приготовление суспензии и орошение абсорбера.

При этом стоит отметить, что реализация данного метода может стать причиной накипеобразования и коррозии в системах генерации ТЭС (в частности, это касается градирен и систем охлаждения). Для контроля отложений в практике теплоснабжения используют нормативный показатель – карбонатный индекс (I_k), равный произведению кальциевой жесткости на щелочность воды. Так, скорость накипеобразования при температуре нагрева воды до 100 °С и жесткости 3,0 мг-экв/л составляет 2,18 г·м²/ч, при температуре 200 °С и аналогичном значении жесткости этот показатель достигает значения 1 186 г·м²/ч. То есть с повышением температуры на 100 °С интенсивность процесса накипеобразования возрастает практически в 5·10² раз [3].

Снижение концентрации $Ca(OH)_2$ или $CaCO_3$ в поглотительном растворе могло бы способствовать снижению интенсивности накипеобразования в тепловых сетях. Однако в десульфуризационных установках ТЭС растворенный в воде электролит является активным сорбентом диоксида серы [3]. Поэтому уменьшение его концентрации снижает сорбционную емкость поглотительного раствора, что значительно ухудшает технико-экономические показатели работы десульфуризационной установки из-за необходимости более частых замен отработанного раствора свежеприготовленным.

Для разрешения указанного противоречия в работе предложено использование электродиализной установки для обработки минерализованной воды с ее последующим использованием в процессе десульфуризации дымовых газов в качестве щелочных и кислотных растворов.

Электродиализный аппарат (рис. 1) представляет собой установку, созданную по типу фильтра-пресса. Она состоит из катодной камеры, анодной камеры с графитовыми электродами, токопроводами, распределительных рамок и ионитовых мембран.

В качестве электродов также могут быть использованы аноды ОРТА, выполненные из титана с нанесенным на рабочую поверхность активным металлооксидным покрытием на основе диоксида рутения и диоксида иридия. Однако в силу высокой стоимости они были заменены на более доступные и достаточно эффективные графитовые электроды.

В электродиализаторе применяется специальная распределительная рамка, позволяющая создавать многоходовые потоки обрабатываемой воды соединением ячеек как параллельно, так и последовательно. Такое решение создает возможность изменения формулы электродиализа – числа параллельно и последовательно работающих ячеек в одном аппарате в зависимости от качества и требований к обрабатываемой воде. Рамка для создания рабочих ячеек электродиализной установки изготовлена из двух частей, выполненных из поливинилхлорида толщиной 0,7 мм (рис. 2).

Камеры концентрирования включены параллельно для уменьшения гидравлического сопротивления. Компоновка мембран электродиализной установки вертикальная, что обеспечивает хорошую дегазацию ячеек и улучшает гидравлические характеристики сборки.

Эффективность данного процесса во многом определяется типом используемых мембран. В лабораторной установке использованы мембраны марки МК-40, МА-40 и МБ-1 производства ООО «Инновационное Предприятие Щекиноазот».

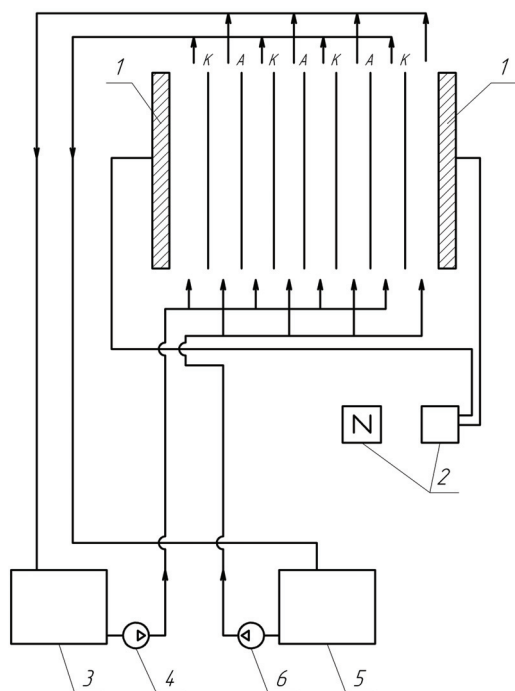


Рисунок 1 – Принципиальная схема электродиализного аппарата (бридера): 1 – электроды; 2 – блок электрического питания; 3, 5 – баки щелочного и кислотного растворов соответственно; 4, 6 – циркуляционные насосы щелочного и кислотного растворов соответственно; К, А – катионитовые и анионитовые мембраны соответственно.

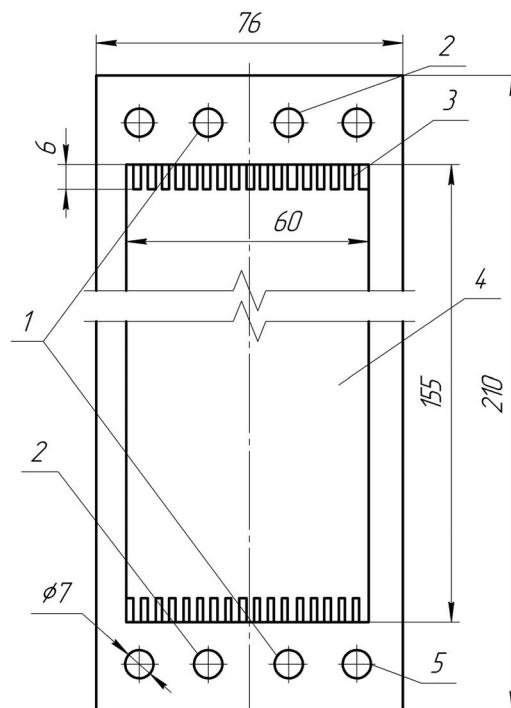


Рисунок 2 – Распределительная рамка: 1 – входное отверстие; 2 – выходное отверстие; 3 – подводящий канал; 4 – внутренняя часть рамки; 5 – отверстие для ввода фиксирующих (стягивающих) шпилек.

В работе [4] установлено, что вводом гашеной извести в растворы сильных электролитов, не содержащих одноименных ионов Ca^{2+} либо OH^- , можно добиться некоторого увеличения ее растворимости, что может быть использовано для интенсификации процессов хемосорбции в различных технологиях газоочистки. Поэтому в качестве модельного раствора использовался водный раствор хлорида натрия ($NaCl$) с солесодержанием 500, 1 000, 1 500 и 3 000 мг/л. Производительность электродиализной установки определялась путем измерения объема щелочного и кислотного растворов за фиксированный промежуток времени. После достижения необходимых скоростей данных растворов подавали напряжение на электродиализную установку.

Одной из основных проблем использования процесса электродиализации для процесса газоочистки является проблема снижения концентрационной поляризации, в значительной степени определяющей экономичность процесса и конструкционные особенности электродиализной установки. Важнейшей характеристикой поляризации мембран является предельная плотность тока. Для определения его параметров использован наиболее распространенный способ – метод анализа вольтамперной характеристики электродиализного пакета. В области низких солесодержаний исходного раствора (до 500 мг/л) при низких скоростях пропускания раствора наблюдается резкий излом вольтамперных характеристик процесса обработки раствора. Увеличение скорости потока до 6...8 см/с приводит к плавному изменению наклона вольтамперных характеристик (рис. 3).

Лабораторные исследования проводились при работе установки по прямоточной схеме. После достижения заданной плотности тока делалась пауза, обеспечивающая 2–3-кратную смену потоков концентрата и диализата в аппарате и установившееся значение тока, протекающего через аппарат.

Для эффективного использования электродиализного аппарата в процессе десульфуризации дымовых газов предлагается реализовать его работу по двум схемам: 2-контурной (рис. 4) и 3-контурной (рис. 5).

В процессе электродиализации водного раствора $NaCl$ происходят следующие реакции. В камере генерации кислотного раствора анионы Cl^- соединяются с образовавшимися в катионитовом слое биполярных мембран с катионами водорода с образованием соляной кислоты по схеме:

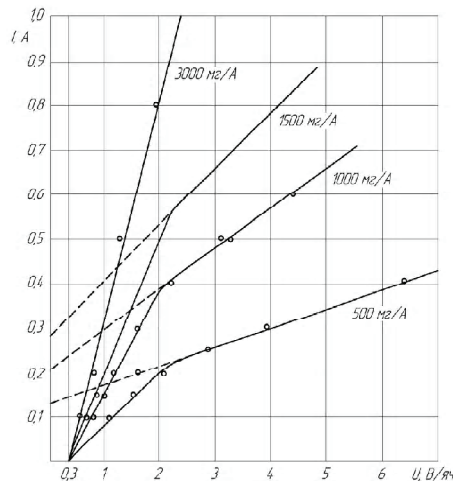


Рисунок 3 – Зависимость величины тока от напряжения, подаваемого на аппарат.

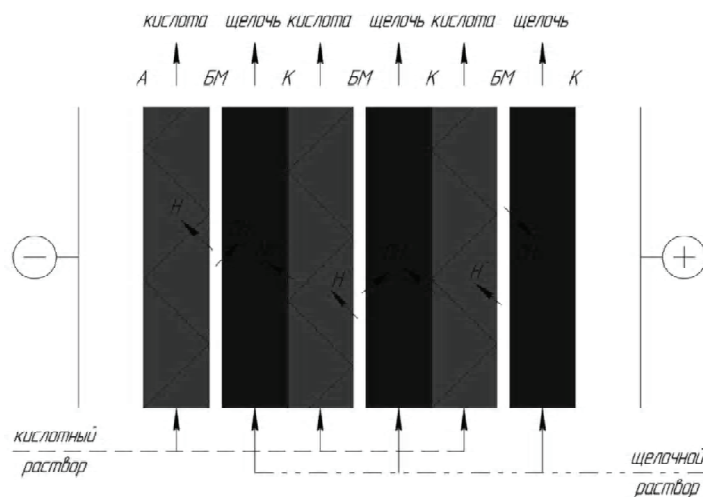


Рисунок 4 – Двухконтурная схема работы электродиализной установки.

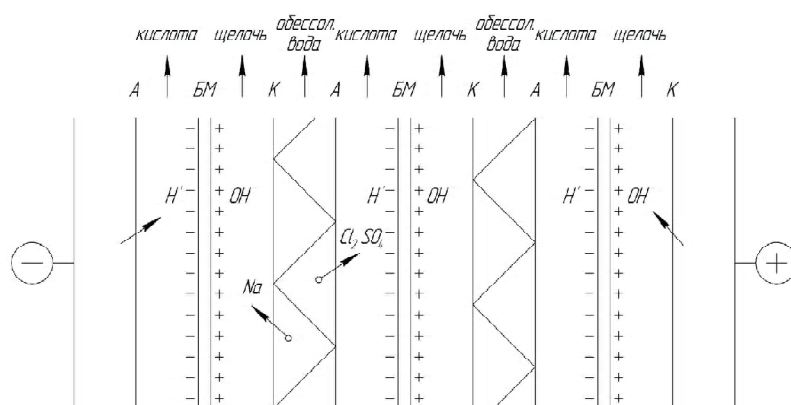
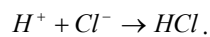
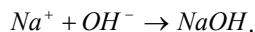


Рисунок 5 – Трехконтурная схема работы электродиализной установки.



Параллельно в камере генерации щелочи катионы Na^+ соединяются с образовавшимися в анионном слое биполярных мембран анионами гидроксила OH^- с образованием едкого натра по схеме:



Данное техническое решение позволяет повысить эффективность технико-экологических показателей эксплуатации ТЭС за счет минимизации экологических и производственных рисков. Полученный в ходе прохождения через ионитовые мембраны под действием постоянного тока щелочной раствор используется непосредственно для нейтрализации SO_2 . Параллельно решается вопрос с накипеобразованием, поскольку кислотный раствор, полученный в процессе электродиализации, может быть использован в оборотных циклах для предотвращения образования осадков накипи в трубах конденсатора и на форсунках градирень. Элементарный водород, выделяющийся на катоде, может быть направлен на подпитку системы охлаждения генераторов ТЭС или на сжигание в котлоагрегатах для подсветки пылеугольного факела.

Помимо всего прочего применение электродиализных установок в процессе десульфуризации газовых выбросов ТЭС позволяет решить серьезную проблему, связанную с контролем вакуума в трубопроводах. Промывка труб кислотным раствором, полученным в результате электродиализации, позволяет минимизировать потери, связанные с недожогом угля на ТЭС. Учитывая, что недожог угля на отечественных ТЭС составляет около 4 т/ч, при его стоимости около 120 долл. за тонну, можно прогнозировать экономию за счет решения данной проблемы в размере 4 000 долл/ч.

Важным экономическим параметром реализации данного технического решения является количество электроэнергии, которую необходимо затратить на процесс электродиализации [5, 6, 7]. В основу вывода уравнения зависимости удельных затрат электроэнергии от параметров работы электродиализной установки положено следующее. При постоянном напряжении, приложенном к мембранам ячеек электродиализатора, прирост затрат находится в следующей зависимости:

$$W = \frac{U \cdot di \cdot S}{\eta \cdot Q \cdot \Delta C}, \quad (1)$$

где U – напряжение, подаваемое на электродиализатор, В;
 i – плотность тока, А/м²;
 S – рабочая поверхность мембран в электродиализаторе, м²;
 Q – расход воды через электродиализатор, м³/ч;
 $\Delta C = C_o - C$ – градиент концентрации раствора (C_o и C – солесодержание обессоливаемой и обессоленной воды соответственно, мг/л);
 η – расход по току.

Расход по току составляет:

$$\eta = \frac{Z \cdot F \cdot D \cdot C}{\delta \cdot i}, \quad (2)$$

где Z – заряд удаленного иона;
 F – постоянная Фарадея, равная 28,6 ч/г-экв;
 D – коэффициент диффузии удаляемых ионов;
 δ – толщина пограничного слоя на границе мембрана-раствор, м.

Подставив уравнение (2) в (1) и разделяя переменные, получим зависимость вида:

$$\frac{dW}{W} = \frac{\delta \cdot di}{Z \cdot F \cdot D \cdot C}. \quad (3)$$

Интегрируя уравнение (3) в пределах, соответственно, от 0 до W и от 0 до i , получим:

$$\ln W = \frac{\delta \cdot i}{Z \cdot F \cdot D \cdot C}. \quad (4)$$

Исследование изменения удельных затрат электроэнергии от плотности тока проводилось при солесодержании обрабатываемой воды 500, 1 000 и 3 000 мг/л. Снижение солесодержания вызывает резкое увеличение удельных затрат на обессоливание воды. При изменении солесодержания от 3 000 до 500 мг/л удельные затраты возрастают от 0,5 до 10 кВт·ч/кг удаляемой соли при плотности тока 40 А/м² и скорости пропуска воды через электродиализатор 2 см/с. Увеличение пропуска воды в 2 раза приводит к резкому снижению затрат электроэнергии. Например, при концентрации исходной воды 500 мг/л и такой же плотности тока 40 А/м² удельные затраты снижаются в 3 раза. Дальнейшее

увеличение скорости потока воды через электродиализатор до 6...8 м/с приводит к снижению удельных затрат электроэнергии.

Проведенные исследования показали, что величина удельных затрат электроэнергии находится в экспоненциальной зависимости от плотности тока, подаваемого на электродиализатор, и может быть выражена уравнением вида:

$$W = 0,3 \cdot e^{a_1 \cdot i}, \quad (5)$$

где a_1 – экспоненциальный множитель, зависящий от расхода обессоливаемой воды.

Данная зависимость позволяет установить влияние скорости пропуска диализата на эффективность процесса обессоливания воды. Увеличение расхода диализата через ячейки обессоливания снижает расход электроэнергии, при этом:

$$W = 0,3 \cdot e^{\frac{a_2 \cdot i}{Q_{0,70}}}, \quad (6)$$

где a_2 – коэффициент, зависящий от солесодержания обрабатываемой воды.

Подставляя экспериментальные значения a_1 и a_2 и выражая расход диализата через скорость, получим зависимость удельных затрат электроэнергии от трех параметров: плотности тока, скорости потока и исходного солесодержания обрабатываемой воды:

$$W = 0,3 \cdot e^{\frac{3,86 \cdot 10^3}{Q_{0,70}^{0,70} \cdot C^{0,84}}}. \quad (7)$$

Показатель степени при скорости потока воды в ячейках, равный 0,7, указывает на то, что поток турбулизирован. Поскольку толщина пограничного слоя при ламинарном потоке пропорциональна $1/Q^{0,5}$ и в турбулентной области $1/Q^{0,6-0,8}$, это подтверждает адекватность полученных данных.

ВЫВОДЫ

1. Предложено использование электродиализной установки для обработки минерализированной воды, позволяющей совершенствовать процесс десульфуризации. Полученный в ходе прохождения через ионитовые мембраны под действием постоянного тока щелочной раствор применяется непосредственно для нейтрализации SO_2 , а кислотный раствор может быть использован в оборотных циклах для предотвращения осаждения накипи в трубах конденсатора и форсунках градирень.

2. Разработаны принципиальные схемы двух- и трехконтурных схем работы электродиализной установки с применением анионитовых, катионитовых и биполярных мембран, позволяющих повысить эффективность процесса десульфуризации отходящих газов ТЭС.

3. Выведены расчетно-аналитические зависимости удельных затрат электроэнергии на процесс обработки воды от трех параметров: плотности тока, скорости потока и исходного солесодержания обрабатываемой воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дариенко, О. Л. К вопросу повышения эффективности десульфуризации дымовых газов на объектах теплоэнергетики [Текст] / О. Л. Дариенко // Современные тенденции развития и перспективы внедрения инновационных технологий в машиностроении, образовании и экономике. – 2016. – № 1. – С. 8–11.
2. Vlassopoulos, Th. Present condition of flue gas cleaning at thermal power stations [Текст] / Th. Vlassopoulos, S. Vysotskij // Сбірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ : Видавництво ЛНАУ, 2008. – № 81. – С. 363–375.
3. Лапотышкина, Н. П. Водоподготовка и водно-химический режим тепловых сетей [Текст] / Н. П. Лапотышкина, Р. П. Сазонов. – М. : Энергоиздат, 1982. – 200 с.
4. Дариенко, О. Л. Повышение эффективности десульфуризации дымовых газов известковым молоком на основе анолита [Электронный ресурс] / О. Л. Дариенко // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 1. – Режим доступа : <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3499>.
5. Высоцкий, С. П. Предотвращение накипеобразования и снижение сброса засолённых стоков в системах теплофикации [Текст] / С. П. Высоцкий, А. В. Варивода // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 5, № 6(65). – С. 4–8.
6. Высоцкий, С. П. Кристаллизация карбоната кальция в оборотных системах водопользования [Текст] / С. П. Высоцкий, С. Е. Гулько // Вода: химия и экология. – 2016. – № 1. – С. 69–75.

7. Ткаченко, В. С. Накипеобразование в теплофикационных системах [Текст] / В. С. Ткаченко, С. П. Высоцкий // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2016. – Выпуск 2016-4(120). – С. 101–103.
8. Pattarkine, V. M. Advanced lagoon treatment technologies for wastewater treatment [Текст] / V. M. Pattarkine, R. C. Chann, C. E. Tharp // Proceedings of the Water Environment Federation. – 2006. – Vol. 38. – P. 2991–3002.
9. Designing sustainable waste water systems: Generating Design Alternatives [Текст] / B. Chamberlain, A. Zarei, H. Taheri, D. Poole [and others] // Journal of Environment Management. – 2008. – № 88 (3). – P. 437–447.

Получено 11.09.2017

О. Л. ДАРИЄНКО

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ ТЕПЛОВИХ
ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ВІД ДІОКСИДУ СІРКИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ
ЕЛЕКТРОДІАЛІЗНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Автомобільно-дорожній інститут ДООУ ВПО «Донецький національний технічний університет»

Анотація. Запропоновано використання електродіалізної установки для оброблення мінералізованої води з метою вдосконалення процесу десульфуризації відхідних газів теплоелектростанцій. Розроблено принципові дво- і триконтурні схеми роботи електродіалізної установки із застосуванням аніонітових, катіонітових і біполярних мембран, що дозволяють підвищити ефективність процесу оброблення мінералізованої води з метою її подальшого використання в процесі десульфуризації. Виведено розрахунково-аналітичні залежності питомих витрат електроенергії на процес оброблення води від трьох параметрів: щільності струму, швидкості потоку і вихідного солевмісту оброблюваної води.

Ключові слова: десульфуризація, електродіалізатор, накипоутворення, карбонатний індекс, щільність струму, знесолення.

OXSANA DARIENKO

IMPROVEMENT OF GAS CLEANING PROCESSES FOR THERMAL POWER
PLANTS FROM SULFUR DIOXIDE USING ELECTRODIALYSIS TECHNOLOGY

Automobile and Highway Institute «Donetsk National Technical University»

Abstract. The use of an electrodialysis unit for the treatment of mineralized water has been proposed, which makes it possible to optimize the process of desulphurization of waste gases from thermal power plants. Basic schemes of two- and three-circuit schemes for the operation of an electrodialysis unit using anionic, cationic and bipolar membranes have been developed that makes it possible to increase the efficiency of the desalting process of mineralized water for its further use in the desulfurization process. Calculated analytical dependencies of the specific electricity consumption on the process of water treatment from three parameters have been derived: current density, flow rate and initial salinity of the treated water.

Key words: desulphurization, electro dialysis, scaling, carbonate index, current density, desalination.

Дарієнко Оксана Леонидовна – асистент кафедри екології та безпеки життєдіяльності автомобільно-дорожного інституту ГОУ ВПО «Донецький національний технічний університет». Научні інтереси: очистка газових вибросов, природоохоронні технології ТЭС, проблеми зміни клімату.

Дарієнко Оксана Леонідівна – асистент кафедри екології та безпеки життєдіяльності автомобільно-дорожного інституту ДООУ ВПО «Донецький національний технічний університет». Наукові інтереси: очищення газових викидів, природоохоронні технології ТЕС, проблеми зміни клімату.

Darienko Oksana – assistant, Ecology and Life Safety Department, Automobile and Highway Institute «Donetsk National Technical University». Scientific interests: purification of gas emissions, environmental technologies of thermal power plants, problems of climate change.

УДК 536.24

В. Н. КАЧАН, А. В. ЛУКЬЯНОВ, Е. В. КОНОПАЦКИЙ

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЁТА ЭЛЕМЕНТОВ КОНВЕКТИВНОЙ ЧАСТИ ЖАРОТРУБНЫХ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОАГРЕГАТОВ

Аннотация. Представлено математическое описание гидродинамических и массообменных элементарных событий процесса теплообмена на примере жаротрубного водогрейного котла ВК-34. Эти события объединены в математическую модель через баланс времени пребывания воды и продуктов сгорания и традиционный тепловой баланс в объёме котла, что упрощает процесс перерасчёта необходимого количества топлива и теплоносителя при изменении вида и качества топлива.

Ключевые слова: предварительный расчёт, математическая модель, конвективная часть, продукты сгорания, газ, теплоноситель, КПД теплопередачи, оптимизация.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Необходимость перерасчёта конструктивных элементов конвективного пучка возникает при проверочном расчёте любого котлоагрегата при замене топлива (его вида, химсостава, теплотворной способности). Проверочный и конструктивные расчёты проводятся обычно поэтапно после расчёта теплопередачи к воде в топочном пространстве и определении температуры отходящего газа из топки по ходу продуктов сгорания через фестон, конвективные пучки труб, экономайзер, воздухо- и водоподогреватели, каждый раз задаваясь температурой уходящего потока газа продуктов сгорания.

Пересчитывать приходится много раз, приближаясь к допустимой невязке, равной 0,5 % от Q_p^p в кДж [1]. Но даже при таких условиях во многих случаях необходимый размер невязки остаётся недосяжимым при одновременно заданных значениях расхода топлива и теплоносителя.

Вместе с тем требуемое значение невязки можно достичь, если оптимизировать расход топлива или теплоносителя в зависимости от необходимых эксплуатационных требований.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Обычно, согласно известным методикам разных авторов, в расчёте используется баланс теплоты в целом для всего котлоагрегата и даже не упоминается временной фактор. Например, в работах [2, 3].

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Расчёт конвективных элементов котлоагрегата является достаточно сложной технической задачей, основанной, как было сказано выше, на балансе теплоты. Суть новой методики заключается в том, что, кроме баланса теплоты, необходимо использовать баланс времени пребывания нагреваемой воды и продуктов сгорания топлива, а также в отдельных случаях балансы мощности, расходов теплоносителя и топлива.

Рассмотрим вариант предварительного расчёта конвективных элементов котла ВК-34 с использованием не только баланса теплоты, но и баланса времени пребывания теплоносителя (воды) и продуктов сгорания топлива по всей цепочке теплопередачи (в фестоне, конвективных пучках, экономайзере, водо- и воздухоподогревателях). Время пребывания воды в рамках объёма внутри котла всегда будет намного больше, чем время пребывания продуктов сгорания внутри котла, так как их

плотности отличаются почти на три-четыре порядка (воды с плотностью $1\,000\text{ кг/м}^3$ и дымовым газом с плотностью около $0,265\text{ кг/м}^3$ при температуре $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$) и более [4–6]. Поэтому внутрикотловой объём воды будет аккумулировать теплоту от десятков таких объёмов продуктов сгорания топлива, проходящих через котёл за время пребывания (нагрева) воды в котле:

$$\tau_{\text{преб.в}} \gg (\tau_{\text{преб.з.т}} + \tau_{\text{преб.з.к}}), \quad (1)$$

где $\tau_{\text{преб.в}}$ – время пребывания воды в котле, необходимого для нагрева её от 60 до $105\text{ }^\circ\text{C}$, с;
 $\tau_{\text{преб.з.т}}$, $\tau_{\text{преб.з.к}}$ – время пребывания продуктов сгорания мазута в топке и в конвективной части котла, с.

Более подробно эти балансы рассмотрим в математической форме на примере жаротрубного водогрейного котла ВК-34.

1. Баланс времени нахождения теплоносителя-воды и продуктов сгорания.

Такой баланс времени можно достичь только с учётом виртуального коэффициента выравнивания времени по формуле:

$$\kappa_{\text{вырав}} = \tau_{\text{преб.в}} / (\tau_{\text{преб.з.т}} + \tau_{\text{преб.з.к}}). \quad (2)$$

Тогда уравнение (1) можно представить в виде:

$$\tau_{\text{преб.в}} = \kappa_{\text{вырав}} (\tau_{\text{преб.з.т}} + \tau_{\text{преб.з.к}}). \quad (3)$$

2. Для достижения поставленной задачи составим уравнение секундного желаемого баланса теплоты для котла в целом, кДж:

$$Q_v = (Q_{\text{з.т}} + Q_{\text{з.к}}), \quad (4)$$

где $Q_{\text{з.т}}$ и $Q_{\text{з.к}}$ – это теплоты, переданные воде в топке и в конвективной части котла, кДж;
 Q_v – теплота, необходимая для нагрева теплоносителя-воды при его постоянном расходе
 $G_v = 11,1\text{ кг/с}$, равная:

$$Q_v = G_v (4,18 \cdot C_v) \Delta t_v \rho_v, \quad (5)$$

где C_v – теплоёмкость воды, равная $1,008\text{ ккал/(кг град)}$;
 $4,18$ – переводной коэффициент, кДж/ккал $^\circ\text{C}$.
 $\Delta t_v = 105 - 60 = 45\text{ }^\circ\text{C}$ – разность температур теплоносителя на входе и на выходе;
 ρ_v – плотность воды, равная $1\,000\text{ кг/м}^3$.

Баланс времени пребывания

А) воды в конвективной части:

$$\tau_{\text{преб.в}} = V_v / (S_{\text{меж.тр}} v_{\text{в.меж.тр}}), \quad (6)$$

где $S_{\text{меж.тр}}$ – живое сечение для прохода воды через конвективную часть котла, м^2 ;
 $v_{\text{в.меж.тр}}$ – скорость движения нагреваемой воды, м/с ;
 V_v – объём воды в межтрубном пространстве, м^3 ; определяемый по формулам:

$$V_v = V_{\text{меж.тр}} + V_{\text{торц}} - V_{\text{тр.к}}, \quad (7)$$

$$V_{\text{меж.тр}} = \pi/4 \cdot [(D_{\text{вн.к}}^2 - D_{\text{н.т}}^2) \cdot L_{\text{к.тр}} + D_{\text{вн.к}}^2 L_{\text{торц}}] - V_{\text{тр.к}}, \quad (8)$$

где $D_{\text{вн.к}}$ и $D_{\text{н.т}}$ – соответственно внутренний диаметр конвективной части и наружный диаметр топки котла, м;

$L_{\text{к.тр}}$ и $L_{\text{торц}}$ – протяжённость конвективных трубок и толщина торцевой части котла, м;

$V_{\text{тр.к}}$ – суммарный объём конвективных трубок, м^3 .

Б) продуктов сгорания в топке:

$$\tau_{\text{преб.з.т}} = V_{\text{з.т}} / (S_{\text{вых.з.т}} v_{\text{з.т.ср}}), \quad (9)$$

где $S_{\text{вых.з.т}}$ – живое сечение выхода газа из топки, м^2 ;

$v_{\text{з.т.ср}}$ – средняя скорость движения газа в топке, м/с ;

$V_{\text{з.т}}$ – объём дымовых газов в топке, м^3 , который рассчитывается по формуле:

$$V_{z.m.} = V_m - V_{фак} + V_{вход.к}, \quad (10)$$

где V_m – объём топки, м³;
 $V_{фак}$ – объём топливного факела, м³;
 $V_{вход.к}$ – объём газа во входном пространстве в конвективную часть, м³.

$$V_m = 0,786 \cdot D_{вн.т}^2 \cdot L_m,$$

здесь $L_m = 2,253$ м – протяжённость топки.

Выполним расчёт объёма топливного факела в виде конуса:

$$V_{фак} = 1/3 \cdot 0,786 \cdot L_{фак} \cdot (0,12 + 0,1 \cdot 0,48 + 0,482).$$

В) продуктов сгорания в конвективной части котла, с:

$$\tau_{проб.з.к} = V_{z.к} / (\Sigma S_{z.тп} v_{z.тп.ср}), \quad (11)$$

где $V_{z.к} = V_{z.т.}$

$$\Sigma S_{z.тп} = \pi / 4 d_{вн}^2 \cdot Z, \quad (12)$$

$$v_{z.тп} = B_p W_{z.к} / \Sigma S_{тп.вн}, \quad (13)$$

где $B_p = 0,06$ кг/с – секундный расход мазута;
 $W_{z.к} = 12,05$ м³/кг – удельный объём продуктов сгорания мазута; число трубок;
 $d_{вн}$ – внутренний диаметр трубок, м.

Тогда в развёрнутом виде коэффициент выравнивания временного баланса будет равен:

$$\kappa_{вырав.} = \frac{V_{\theta}}{S_{меж.пр} v_{\theta.меж.пр} (V_{z.к} / (\Sigma S_{z.тп} v_{z.тп.ср}) + V_{z.т} / (\Sigma S_{вых.з.т} v_{z.т.ср}))}. \quad (14)$$

Тепловой баланс

С учётом $\kappa_{вырав.}$ распишем составляющие внутрикотлового теплового баланса (4) в кДж:

$$Q_{\theta} = \kappa_{вырав.} (Q_{z.к} + Q_{z.т}). \quad (15)$$

$$Q_{\theta} = (4,18 \cdot C_{\theta} \cdot \Delta t_{\theta} \cdot \rho_{\theta}). \quad (16)$$

А) поглощение теплоты водой в топке:

$$Q_{z.т} = B_p W_{z.т} V_{z.т} \cdot \rho_{z.т.ср} \cdot \Delta I_{z.т} / (S_{вых.з.т} v_{z.т.ср}), \quad (17)$$

где $\Delta I_{z.т} = I_{z.ф} - I_{z.вых.т.}$

Выше снижение энтальпии продуктов сгорания в топке, кДж/кг.

Б) поглощение теплоты водой в конвективной части:

$$Q_{z.к} = B_p W_{z.к} V_{z.к} k_{исп} \cdot \rho_{z.к.ср} \Delta I_{z.к} / ((\Sigma S_{z.тп} v_{z.тп.ср})), \quad (18)$$

где $\rho_{z.к.ср}$ – средняя плотность дымового газа в конвективной части с учётом снижения температуры от 1 054 до 210 °С.

Начальную плотность приравняем к плотности на выходе из топки, т. е. $\rho_{z.т} = \rho_{z.к.н} = 0,265$ кг/м³.

$$\rho_{z.к.ср} = 0,5(\rho_{z.к.н} + \rho_{z.к.к}),$$

где $\rho_{z.к.к} = 273 / (273 + t_{210})$ кг/м³.

Коэффициент использования теплоты $k_{исп} = 1 - (q_{мех.н} + q_{т.пот}) = 1 - (0,003 + 0,035) = 0,962$.

С учётом вышеизложенного, подставляя формулы (16), (17), (18) для расчёта необходимой теплоты для нагрева воды Q_{θ} и поглощённой теплоты в топке и конвективной части $Q_{z.т}$ и $Q_{z.к}$, запишем основное уравнение конструктивно – поверочного расчёта элементов конвективного пучка:

$$4,18 C_{\theta} V_{\theta} \rho_{\theta} \Delta t_{\theta} = \kappa_{вырав.} B_p W_{z.к} V_{z.к} k_{исп} [\Delta I_{z.к} \rho_{z.к.ср} / (\Sigma S_{z.тп} v_{z.тп.ср}) + \Delta I_{z.т} \rho_{z.т.ср} / (S_{вых.з.т} v_{z.т.ср})]. \quad (19)$$

Невязка между полезно использованной теплотой (левая часть уравнения) и переданной воде горячим газом рассчитывается по формуле (19):

$$\text{Невязка} = [(\text{правая часть формулы минус левая}) / \text{правая}] \cdot 100 \, \%.$$

Используя предложенную методику, разработана программа «Оптимизация характеристик котлоагрегата» на Visual Basic для расчёта невязки и оптимизированных значений расходов топлива и теплоносителя. Оптимизация была выполнена путем последовательного перебора значений расхода теплоносителя. Так, для котла ВК-34 мощностью 630 кВт при использовании природного газа и теплоносителя – воды с температурным режимом 115/70 °С была достигнута минимальная невязка 0,02 % только при расходе теплоносителя 5,31 кг/с. При этом внутренний диаметр конвективных трубок и их количество остались неизменными (заводскими) и равными 35 мм и 96 шт. Таким образом, оптимизация показала, что поверхность нагрева воды практически не влияют на невязку. Необходимо отметить также, что в зависимости от эксплуатационных требований возможна оптимизация не только по расходу теплоносителя, но и по расходу топлива.

ВЫВОДЫ

1. Самым приемлемым вариантом достижения нормативной невязки является вариант с использованием баланса мощностей.
2. Путём оптимизации на ЭВМ на примере котла ВК-34 за счет увеличения поверхности нагрева воды не удалось снизить невязку до нормативной 0,5 %.
3. Полученный $k_{\text{выр}} \approx 10-12$ оказался близким к оптимальному для котлов типа ВК-34 при использовании низкосернистого мазута и природного газа.
4. Работа будет продолжена с целью использования в курсовых и дипломных работах.
5. В перспективе будет разработана более обширная математическая модель по расчёту на ЭВМ оптимальных конструктивных элементов всего котлоагрегата, которая позволит увеличить КПД таких котлов примерно на 1...3 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лук'янов, О. В. Теплогенераторы для локальных систем теплоснабжения [Текст] / О. В. Лук'янов. – Макіївка : Донбаська держ. акад. буд. і арх., 2003. – 156 с.
2. Тепловой расчёт котельных агрегатов. Нормативный метод [Текст] / Под ред. Н. В. Кузнецова, В. В. Митора, И. Е. Дубовского, Э. С. Карасиной. – М. : Энергия, 1973. – 296 с.
3. Тепловой расчёт промышленных теплоагрегатов [Текст] / Под ред. В. И. Частухина. – К. : Выща школа, 1980. – 183 с.
4. Скрыпников, В. Б. Энергосберегающая технология системы микроклимата промышленного объекта [Текст] / В. Б. Скрыпников. – Днепропетровск : РИО ПГАСА, 2004. – 205 с.
5. Децентрализованное производство тепловой энергии и разработка энергоэффективных водонагревателей для его реализации [Текст] / Б. Д. Сезоненко, В. Ю. Никитин, О. Б. Сезоненко [и др.] // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1999. – № 3. – С. 30–36.
6. Апальков, А. П. Термодинамическая оценка влияния коэффициента избытка воздуха и рециркуляции продуктов сгорания на энергетические характеристики топливоиспользующих агрегатов [Текст] / А. П. Апальков // Пром. теплотехника. – 2004. – Т. 26, № 1. – С. 142–146.

Получено 19.09.2017

В. М. КАЧАН, О. В. ЛУК'ЯНОВ, Є. В. КОНОПАЦЬКИЙ
ВДОСКОНАЛЕННЯ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕМЕНТІВ КОНВЕКТИВНОЇ
ЧАСТИНИ ЖАРОТРУБНИХ ВОДОГРІЙНИХ КОТЛОАГРЕГАТІВ
ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

Анотація. Представлено математичний опис гідродинамічних і масообмінних елементарних подій процесу теплообміну на прикладі жаротрубного водогрійного котла ВК-34. Ці події об'єднані в математичну модель через баланс часу перебування води і продуктів згоряння та традиційний тепловий баланс в об'ємі котла, що спрощує процес перерахунку необхідної кількості палива і теплоносія при зміні виду і якості палива.

Ключові слова: попередній розрахунок, математична модель, конвективна частина, продукти згоряння, газ, теплоносій, ККД теплопередачі, оптимізація.

VLADIMIR KACHAN, ALEXANDER LUKYANOV, EVGENIY KONOPATSKIY
IMPROVEMENT OF THE CALCULATION OF CONVECTIVE PART ELEMENTS
OF HEAT TRAINING WATER HEAT UNITS

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The mathematical description of hydrodynamic and mass-exchange elementary events in the heat exchange process has been presented on the example of a fire-tube hot water boiler VK-34. These events have been combined into a mathematical model through the balance of residence time of water and combustion products and the traditional heat balance in the boiler volume, which simplifies the process of recalculating the required amount of fuel and coolant when the type and quality of the fuel changes.

Key words: preliminary calculation, mathematical model, convective part, combustion products, gas, heat carrier water, heat transfer efficiency, optimization.

Качан Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: оптимизация технологических процессов.

Лукьянов Александр Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: автономные системы теплоснабжения, источники теплоты.

Конопацкий Евгений Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры специализированных информационных технологий и систем ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: разработка инструментов многомерной геометрии в БН-исчислении для геометрического моделирования объектов, процессов и явлений; геометрическое моделирование и оптимизация многофакторных процессов и явлений живой природы, техники, технологии, экономики, строительства и архитектуры.

Качан Володимир Миколайович – доктор технічних наук, професор кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: оптимізація технологічних процесів.

Лук'янов Олександр Васильович – доктор технічних наук, професор кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: автономні системи теплопостачання, джерела теплоти.

Конопацький Євген Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри спеціалізованих інформаційних технологій і систем ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: розробка інструментів багатовимірної геометрії у БН-численні для геометричного моделювання об'єктів, процесів і явищ; геометричне моделювання і оптимізація багатфакторних процесів і явищ живої природи, техніки, технології, економіки, будівництва і архітектури.

Kachan Vladimir – Sc. D. (Eng.), Professor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: optimization of technological processes.

Lukyanov Alexander – Sc. D. (Eng.), Professor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: independent heat supply systems, heat sources.

Konopatskiy Evgeniy – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Specialized Information Technology and Systems Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: development tools multidimensional geometry in BN-calculation for geometric modeling objects, processes and phenomena's; geometric modeling and optimization of multifactor processes and phenomena's of living nature, engineering, technology, economics, civil engineering and architecture.

УДК 662.6

П. А. ГНИТИЁВ

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОДУКТОВ
СГОРАНИЯ ПРИ СЖИГАНИИ БИОГАЗА**

Аннотация. В работе проанализированы основные теплофизические характеристики искусственного топлива – биогаза. Показано, что в сравнении с природным газом степень черноты продуктов сгорания у биогаза выше на 3 %, теплоемкость выше на 2,6 %.

Ключевые слова: биогаз, лучистый теплообмен, степень черноты, теплообменные характеристики газов.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

В последние десятилетия наметилась общемировая тенденция стремления к сокращению потребления энергетических природных ресурсов, в частности газообразного топлива – природного газа. В первую очередь это связано с конечными его запасами, с ростом стоимости добычи, транспортировки и другими факторами. Поэтому остро встает вопрос экономии природных ресурсов, а также замены на более дешевые, возобновляемые энергоносители [1].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В промышленном секторе значительное распространение получили газы, образовавшиеся в результате работы основного оборудования, такие как доменный, коксовый, ферросплавный и другие [2]. Однако использование подобных газов рационально в пределах существующего предприятия либо на близлежащих производствах. В случае отсутствия крупного металлургического и машиностроительного производства и существующей потребности в энергетических носителях актуальным вопросом является поиск альтернативных энергетических топлив. Одним из возможных источников тепловой энергии в непромышленных районах может выступать искусственный газ – биогаз [3].

Для получения биогаза существуют различные способы и установки. В основу их работы заложено выполнение следующих основных операций [4]:

- загрузка субстрата (заранее подготовленное сырье);
- поддержание требуемой температуры внутри установки;
- отвод газов;
- выгрузка отработанного вещества.

При детальном рассмотрении технологии получения биогаза следует отметить, что основным сырьем для его производства выступают органические отходы, например от сельскохозяйственных ферм. Производственный процесс включает в себя несколько стадий:

- жиры и углеводы в результате жизнедеятельности бактерий переходят в гидролизные бактерии в период гидролизной фазы, при этом образуются аминокислоты, глюкоза и жирные кислоты;
- кислотообразующая фаза, в которой образуются ферментные бактерии, такие как органические кислоты, спирты, альдегиды, водород, диоксид углерода, аммиак и сероводород;
- ацетогенная фаза, в которой органические кислоты под действием ацетогенных бактерий преобразуются в уксусную кислоту;
- метаногинез, при протекании которого уксусная кислота разлагается на метан, воду и углекислый газ, в свою очередь, водород и углекислый газ преобразуются в метан и воду.

Следует отметить, что получаемый биогаз состоит по большей части из природного газа и может быть использован в качестве его более дешевой альтернативы.

Для оценки необходимого расхода биогаза с целью замены природного газа в любом технологическом агрегате зачастую прибегают к использованию формулы расчета коэффициента замены:

$$K_{\text{зам}} = \frac{Q_{\text{н.пр.}}^p}{Q_{\text{н.зам.}}^p}.$$

Однако такой расчет является очень условным и упрощенным, не дающим возможность учета особенностей теплообмена в топках энергетических агрегатов при использовании искусственных газов. В некоторой степени вопрос замены рассмотрен в работах [5, 6].

ЦЕЛЬ

Целью данной работы является исследование характеристик продуктов сгорания биогаза, определяющих ход теплообменных процессов в технологических агрегатах.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Одной из важных характеристик теплообмена между продуктами сгорания и тепловоспринимающими поверхностями при лучистом способе передачи тепла является приведенная степень черноты системы, зависящая от степени черноты каждого из входящих в нее элементов. Поэтому при использовании альтернативных видов топлива в промышленных агрегатах важно знать степень черноты, теплоемкость продуктов сгорания заменяющих топлив.

Для исследования выбраны различные составы биогаза, характеристики которых сравниваются с природным газом. Из литературных источников известно [7], что основным компонентом биогаза является природный газ – метан (CH_4), его концентрация варьируется в пределах 50–70 %, также большую долю занимает двуокись углерода (CO_2) – порядка 30–45 %, оставшуюся часть занимают примеси водорода (H_2), азота (N_2) и сероводорода (H_2S). Перед использованием биогаза необходимо произвести его десульфурацию с целью минимизации образования окислов серы (SO_2) и, как следствие, серной кислоты (H_2SO_4) в продуктах сгорания. Дальнейшие исследования проведены для очищенного газа.

Для сравнения выбран типичный состав природного газа (Березовское месторождение, Тюменская область, РФ) и несколько составов биогаза, согласно различным условиям его получения. Исходные составы приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Состав исследуемых топлив

Вид газа	Содержание компонентов, %						
	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	CO_2	N_2	H_2
Природный газ	95,1	1,1	0,3	0,1	0,4	3,0	–
Биогаз № 1	64,0	–	–	–	34,0	1,0	1,0
Биогаз № 2	52,0	–	–	–	45,0	1,5	1,5

Выполнен расчет горения топлив при сжигании газов с коэффициентом расхода воздуха $\alpha = 1,1$, получены опорные результаты:

– действительное количество воздуха, необходимое для сжигания 1 м^3 газа составило:

$$V_{\text{дв.пг.}} = 10,03 \text{ м}^3/\text{м}^3, V_{\text{дв.№ 1}} = 6,57 \text{ м}^3/\text{м}^3; V_{\text{дв.№ 2}} = 5,35 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

– суммарное количество продуктов сгорания составило:

$$V_{\text{пс.пг.}} = 11,04 \text{ м}^3/\text{м}^3, V_{\text{пс.№ 1}} = 7,56 \text{ м}^3/\text{м}^3, V_{\text{пс.№ 2}} = 6,35 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

– процентный состав продуктов сгорания представлен в таблице 2.

Калориметрические температуры горения газов соответственно равны $t_{\text{кал.пг.}} = 1\,924 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{\text{кал. № 1}} = 1\,816 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{\text{кал. № 2}} = 1\,753 \text{ }^\circ\text{C}$.

С целью исследования теплообменных характеристик топлив условно выбрана камера сгорания кубической формы с размерами сторон $a = 2$ метра и степенью черноты внутренней поверхности $\xi = 0,8$. Камера представляет собой имитацию топki котла.

Таблица 2 – Состав продуктов сгорания для исследуемых топлив

Вид газа	Содержание компонентов, %			
	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂
Природный газ	8,97	19,67	0,89	70,47
Биогаз № 1	12,96	18,95	0,85	67,24
Биогаз № 2	15,28	18,46	0,83	65,43

Парциальное давление двуокиси углерода в продуктах сгорания газов составляет $P_{CO_2}^{nz} = 8,868$ кПа; $P_{CO_2}^{№1} = 12,957$ кПа; $P_{CO_2}^{№2} = 15,283$ кПа; водяных паров $P_{H_2O}^{nz} = 19,667$ кПа; $P_{H_2O}^{№1} = 19,667$ кПа; $P_{H_2O}^{№2} = 19,667$ кПа. Исходя из размеров камеры, эффективная длина луча между поверхностями теплообмена составит $S = 1,2$ метра. Произведение парциального давления на эффективную длину луча для CO₂ составит: $P_{P.S/CO_2}^{III} = 10,762$ кПа·м; $P_{P.S/CO_2}^{№1} = 15,549$ кПа·м; $P_{P.S/CO_2}^{№2} = 18,34$ кПа·м; для H₂O составит: $P_{P.S/H_2O}^{nz} = 23,6$ кПа·м; $P_{P.S/H_2O}^{№1} = 22,742$ кПа·м; $P_{P.S/H_2O}^{№2} = 22,157$ кПа·м.

При помощи номограмм [8] определены степени черноты двуокиси углерода и водяных паров, а также поправочный коэффициент на парциальное давление для водяного пара. Составлены функции для вышеуказанных параметров, позволяющие построить график зависимости приведенной степени черноты продуктов сгорания исследуемых газов от температуры в диапазоне наибольшего влияния лучистой передачи тепла – 1 000–1 900 °С. Результаты приведены на рисунке, а. Из графиков видно, что приведенная степень черноты и теплоемкость продуктов сгорания у биогазов выше, чем у природного газа. Это связано с повышенным содержанием трехатомных газов в исходном составе биогаза, в частности CO₂. С точки зрения теплопередачи излучением повышение степени черноты продуктов сгорания влечет за собой усиление теплообмена внутри камеры при прочих равных условиях.

Для исследования теплоемкости продуктов сгорания газов получены уравнения при помощи регрессионного анализа для каждого компонента в следующем виде, кДж/(м³·К):

Для O₂: $C_{O_2} = 1,299 + 2,319 \cdot 10^{-4} \cdot t - 6,459 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 + 8,186 \cdot 10^{-12} \cdot t^3$.

Для N₂: $C_{N_2} = 1,284 + 9,133 \cdot 10^{-5} \cdot t + 1,916 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 - 7,316 \cdot 10^{-12} \cdot t^3$.

Для CO₂: $C_{CO_2} = 1,612 + 8,905 \cdot 10^{-4} \cdot t - 3,536 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 + 5,54 \cdot 10^{-11} \cdot t^3$.

Для H₂O: $C_{H_2O} = 1,487 + 1,911 \cdot 10^{-4} \cdot t + 6,05 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 - 1,831 \cdot 10^{-11} \cdot t^3$.

С учетом состава продуктов сгорания исследуемых газов построены кривые зависимости теплоемкости продуктов сгорания от температуры в диапазоне 0...1 900 °С. Результаты приведены на рисунке, б. Информация о количественном значении теплоемкости продуктов сгорания необходима для расчета теплообмена в хвостовых поверхностях котла.

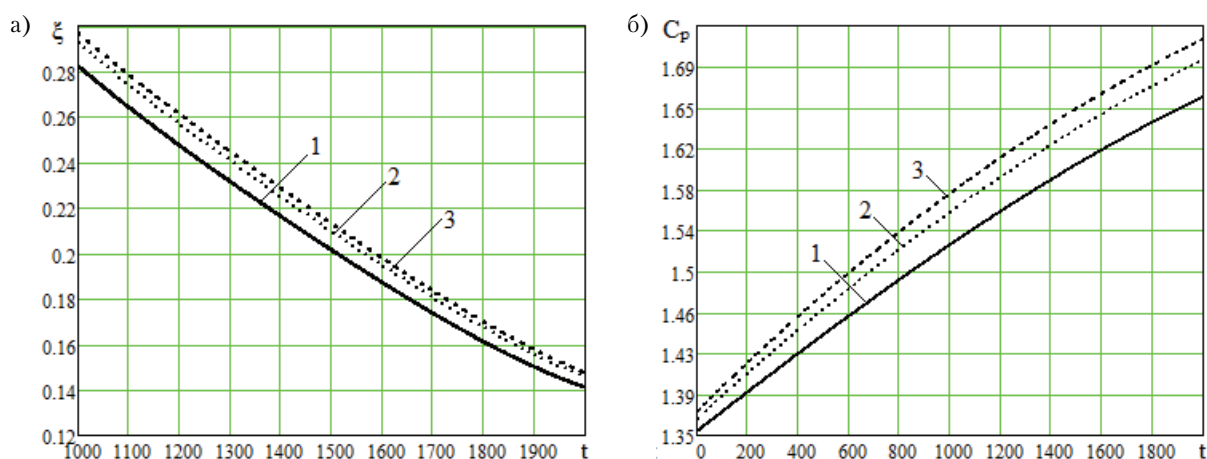


Рисунок – Теплообменные параметры продуктов сгорания природного газа и биогазов в зависимости от степени черноты ξ (а) и теплоемкости C_p , кДж/(м³·К) (б) продуктов сгорания природного газа (1) и двух составов биогаза (2, 3) от температуры.

Для более полного анализа теплофизических характеристик продуктов сгорания в случае доминирования конвективной составляющей передачи тепла (диапазон температур 100...1 000 °C) проведен анализ изменения коэффициента теплопроводности и кинематической вязкости дымовых газов для исследуемых составов топлив. В результате получено практически полное совпадение кривых.

ВЫВОДЫ

В работе исследованы теплообменные характеристики искусственного газа – биогаза и проведено сравнение результатов с традиционным газообразным топливом – природным газом. Отмечено, что для исследованных искусственных газов степень черноты продуктов сгорания выше, что связано с увеличенным содержанием CO₂ в исходном топливе и, соответственно, в продуктах сгорания. В среднем увеличение степени черноты для первого состава топлива составило 2,5 %, для второго – 3,4 %. Увеличение значений теплоемкости продуктов сгорания биогаза в отличие от природного газа составляет в среднем 2 % для первого состава и 3,1 % для второго состава биогаза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биоэнергетика: мировой опыт и прогнозы развития [Текст] / Л. С. Орлик, Н.Т. Сорокин, В. Ф. Федоренко [и др.]. – М. : ФГНУ «Росинформагротех», 2008. – 404 с.
2. Актуальные проблемы энергетики АПК [Текст] / под ред. А. В. Павлова. – Саратов : Саратовский ГАУ, 2013. – 378 с.
3. Alemayehu, Yitayal Addis. Enhancement and Optimization Mechanisms of Biogas Production for Rural Household Energy in Developing Countries [Текст] / Yitayal Addis Alemayehu // International Journal of Renewable Energy Development. – 2015. – Vol. 4, № 3. – P. 189–196.
4. Mulinda, Cyimana. Dissemination and Problems of African Biogas Technology [Текст] / Cyimana Mulinda, Qichun Hu, Ke Pan // Energy and Power Engineering. – 2013. – Vol. 5. – P. 506–512.
5. Бирюков, А. Б. Анализ технологии производства биогаза из органических отходов для замены природного газа [Текст] / А. Б. Бирюков, П. А. Гнitiйов, И. П. Дробышевская // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2017. – № 1(7). – С. 25–31.
6. Бирюков, А. Б. Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах [Текст] : Монография / А. Б. Бирюков. – Донецк : Ноулидж, Донецкое отделение, 2012. – 247 с.
7. Weiland, P. Production and energetic use of biogas from energy crops and wastes in Germany [Текст] / Peter Weiland // Applied Biochemistry and Biotechnology. – 2003. – Volume 109, Issue 1–3. – P. 263–274.
8. Казанцев, Е. И. Промышленные печи [Текст] / Е. И. Казанцев. – М. : Металлургия, 1975. – 368 с.

Получено 19.09.2017

П. А. ГНІТІЙОВ

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІННИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОДУКТІВ
ЗГОРЯННЯ ПРИ СПАЛЮВАННІ БІОГАЗУ

ДОНУ ВПО «Донецький національний технічний університет»

Анотація. В роботі проаналізовані основні теплофізичні характеристики штучного палива – біогазу. Показано, що в порівнянні з природним газом ступінь чорноти продуктів згоряння у біогазу вище на 3 %, теплоємність вище на 2,6 %.

Ключові слова: біогаз, теплообмін випромінюванням, ступінь чорноти, теплообмінні характеристики газів.

PAVEL GNITIEV

INVESTIGATION OF HEAT-EXCHANGE CHARACTERISTICS OF COMBUSTION
PRODUCTS DURING BIOGAS COMBUSTION

Donetsk National Technical University

Abstract. The paper analyzes the main thermo physical characteristics of artificial fuel – biogas. It has been shown that, in comparison with natural gas, the degree of blackness of the combustion products in biogas is higher by 3 %, the heat capacity is higher by 2,6 %.

Key words: biogas, radiant heat exchange, degree of blackness, heat exchange characteristics of gases.

Гнitiйёв Павел Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры технической теплофизики ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет». Научные интересы: металлургическая теплотехника, ресурсоэнергосберегающие технологии, оптимизация энергозатрат.

Гнitiйов Павло Олександрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної теплофізики ДОУ ВПО «Донецький національний технічний університет». Наукові інтереси: металургійна теплотехніка, ресурсоенергозберігаючі технології, оптимізація енерговитрат.

Gnitiev Pavel – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Technical Thermo physics Department, Donetsk National Technical University. Scientific interests: metallurgical heat engineering, resource-energy-saving technologies, optimization of energy costs.

УДК628.85

З. В. УДОВИЧЕНКО, О. В. МИХАЙСКАЯ, Н. Р. УДОВИЧЕНКО
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»**НОРМИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА**

Аннотация. В статье приведен общий обзор европейских и международных норм, регламентирующих принципы нормирования параметров микроклимата помещений, а также дан анализ и сравнительная характеристика требований отечественных и международных норм.

Ключевые слова: микроклимат помещений, параметры микроклимата, тепловой комфорт.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

На сегодняшний день установлено, что 90 % времени человек проводит в помещении [1], в связи с этим определяющее влияние на общее текущее состояние человека и на его здоровье в целом оказывает микроклимат помещения.

В общем понимании среда, в которой человек существует в помещении, называется микроклиматом. С научной же точки зрения микроклимат – это условия внутренней среды помещения, влияющие на тепловой обмен человека с окружением путем конвекции, кондукции, теплового излучения и испарения влаги; эти условия определяются сочетанием температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха, температуры окружающих человека поверхностей и интенсивности теплового (инфракрасного) облучения [2].

Комфортное состояние человека в помещении обеспечивает баланс перечисленных выше основных параметров микроклимата. Еще в 1884 г. И. И. Флавицкий выявил комплексное воздействие метеорологических факторов на человека.

Основное влияние на формирование комфортного для жизнедеятельности человека микроклимата оказывают факторы внешней среды, планировочные решения при строительстве здания и режимы работы инженерных сетей в рассматриваемых зданиях. Особенно чувствителен организм человека к тепловым условиям и качеству воздуха в помещении.

Обеспечение заданных показателей микроклимата является одной из основных задач специалистов по строительной теплофизике, отоплению, вентиляции и кондиционированию воздуха. За рубежом исследования теплоощущений человека в помещении легли в основу большого числа национальных и международных стандартов на тепловой микроклимат и параметры воздушной среды.

ЦЕЛЬ

Проанализировать особенности современного подхода к нормированию микроклимата в помещениях с учетом ряда дополнительных факторов, максимально учитывающих индивидуальные потребности каждого человека, находящегося в помещении.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Задаче определения численных значений параметров комфортного микроклимата посвящено значительное количество исследований. В частности, датским профессором Оле Фангером, общепризнанным исследователем в этом направлении в последние десятилетия, получено уравнение теплового комфорта на базе балансовых уравнений явной и скрытой теплоотдачи человеком [3]:

$$6,91 + \frac{M}{F_d} (0,45 - 0,601\eta + 0,003P + 0,0014t_b) + 0,407P = 4k \left[\left(\frac{t_{од} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_k + 273}{100} \right)^4 \right] + k\alpha_b(t_{од} - t_k), \quad (1)$$

где M/F_d – удельное значение метаболического тепла, Вт/м;
 η – механический коэффициент полезного действия;
 P – парциальное давление водяного пара в воздухе, мм рт.ст.;
 $t_{од}$ – температура одежды, °С;
 k – коэффициент теплопередачи одежды, кло (1 кло = 0,155 м²·°С/Вт);
 α_b – коэффициент теплообмена, Вт/м²·°С.

В уравнении комфорта учтены различные факторы, определяющие ощущения теплового комфорта: параметры микроклимата – t_b , t_r , P , V (в скрытом виде); одежда человека – k , $R_{од}$; характер физической работы – M/F_d , η .

В отечественной литературе существует понятие условий комфортности [4].

Первое условие комфортности температурной обстановки определяет такую область сочетаний температуры внутреннего воздуха t_b и радиационной температуры помещения t_r при которых человек, находясь в центре рабочей зоны, не испытывает ни перегрева, ни переохлаждения. В общем случае первое условие комфортности определяет энергетический баланс организма человека и окружающей среды и описывается формулой П. О. Фангера:

$$M = W + Q_g + Q_k, \quad (2)$$

где M – количество тепла, вырабатываемого организмом, Вт/м²;
 W – объем производимой механической работы, Вт/м²;
 Q_g – общее количество тепла, выделяемого при дыхании, Вт/м²;
 Q_k – общее количество тепла, отводимого через кожу, Вт/м².

Формула (2) учитывает значительное количество параметров окружающего микроклимата и индивидуальные характеристики человека.

Количество отводимого от тела тепла зависит от разницы температуры между телом и окружающей воздушной средой, потерь тепла от окружающих стен, кожных испарений, потерь тепла при дыхании.

На комфортную для организма температуру внутреннего воздуха влияют тип одежды и величина метаболизма. Для определения количества тепла, выделяемого при различных видах деятельности, вводится показатель Met (метаболизм), равный 58 Вт/м². Одежда имеет теплоизоляционный эффект, который оценивается коэффициентом «Clo» = 0,155 м²·К/Вт [5].

Второе условие комфортности определяет допустимые температуры нагретых и охлажденных поверхностей при нахождении человека в непосредственной близости от них. С математической точки зрения, второе условие комфортности определяет границы изменения переменных, входящих в первое условие комфортности.

Опираясь на известные понятия первого и второго условий комфортности, можно с определенной точностью задать необходимые параметры комфортного микроклимата в помещении, так как согласно первому условию комфортности такие параметры существуют, а согласно второму – они лежат в определенных пределах. При этом возникают ситуации, когда человек, по каким-либо причинам, надевает костюм с отличающимся от приведенного в нормативе коэффициента «Clo» или его физическая активность и метаболизм будут отличаться от расчетных значений. В таком случае, несмотря на выполнение первого и второго условий комфортности, температура в помещении не будет комфортной.

Для удовлетворения потребностей каждого человека введено понятие третьего условия комфортности, которое гласит, что с целью соответствия субъективным ощущениям комфорта потребителя параметры микроклимата должны регулироваться индивидуально [6].

Сегодня в развитых странах нормирование параметров микроклимата помещений наиболее полно представлено в международном стандарте ISO 7730:2005 Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the *PMV* and *PPD* indices and local thermal comfort criteria (Эргономика тепловых условий – определение и разъяснение теплового комфорта с использованием *PMV* (Predicted Mean Vote – ожидаемая средняя оценка степени комфорта) и *PPD* (Predicted Percentage of Dissatisfied – ожидаемый процент недовольных микроклиматом) показателей и критериев местного теплового комфорта).

Модель *PMV* (прогнозируемая средняя модель голосования) является одной из лучших известных тепловых комфортных моделей для людей. Она основана на модели комфорта Фангера и связывает энергетический баланс человеческого тела с тепловым ощущением человека, используя прямую эмпирическую функцию. Среднестатистический показатель оценки микроклимата в большой группе людей оценивается по 9-и балльной шкале от «-4 – очень холодно» до «+4 – очень горячо». Комфортному показателю *PMV* соответствует значение «0 – тепловая нейтральность». В модели *PMV* температура одежды является единственным параметром, который реагирует на условия окружающей среды, температура кожи зависит только от активности человека.

В дополнение к значению *PMV* для описания модели теплового комфорта помещения используется соответствующее значение *PPD* (Прогнозируемый процент недовольных микроклиматом), в котором сообщается процент людей, которые будут недовольны существующими климатическими условиями. *PPD* описывает неудовлетворенность людей на основе ощущаемого ими теплового дискомфорта, и поскольку тепловой дискомфорт все ощущают по-разному, показатель *PPD* никогда не опускается ниже 5 %.

PPD вычисляют, исходя из *PMV*, по формуле

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2). \quad (3)$$

В работе [7] указывается, что необходимо устанавливать значения параметров микроклимата по их комплексному физиологическому влиянию на организм человека, а также учитывать технические и экономические возможности поддержания этих параметров в различных климатических зонах, что особенно сегодня актуально.

Анализ и сравнительная характеристика требований отечественных и международных норм относительно параметров микроклимата указывают, что:

- на комфорт/дискомфорт в помещении влияет больше факторов, чем обычно рассматривается на практике при проектировании. В том числе: степень радиационной температуры нагревательных/охлаждающих поверхностей, неравномерность распределения радиационной температуры, турбулентность воздуха, выделение вредных веществ в помещение в результате воздействия инсоляции на строительные и отделочные материалы и пластиковые окна;
- оборудование дома даже самым современным инженерным оборудованием не гарантирует достижения необходимых параметров теплового комфорта;
- система, которая предварительно запроектирована и эксплуатируется по высоким показателям обеспечения теплового комфорта, не гарантирует удовлетворение микроклиматом, поскольку даже наилучшие условия допускают наличие людей, ощущающих дискомфорт;
- основанием современного создания теплового комфорта является обеспечение индивидуальных потребностей каждого человека при помощи местного (в помещении) автоматического регулирования микроклимата инженерными системами.

Для проектирования систем отопления, охлаждения, вентиляции, освещения и проверки параметров внутренней среды помещений исходные данные в странах Евросоюза принимают согласно с EN 15251:2007 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics (Параметры внутренней среды для проектирования и определения энергоэффективности домов по качеству внутреннего воздуха, теплового состояния, освещенности и акустики). Эта норма включает в себя положения ISO 7730, дополняет их требованиями относительно воздухообмена и акустики для разных типов домов и помещений, включает разъяснения по использованию этих либо других параметров, особенностей проектирования домов с системами охлаждения (кондиционирования), с естественной и принудительной вентиляцией, жилых и нежилых домов и т. д.

Одним из основных отличий от отечественного комплекса нормирования по допустимым и оптимальным параметрам микроклимата является европейское нормирование по четырем уровням обеспечения внутренней среды.

A (I) – наивысший, рекомендуемый для использования в помещениях с чувствительными и болезненными людьми со специфическими требованиями, в частности – умственно неполноценных, больных, детей младшего возраста, лиц пожилого возраста ($PPD < 6 \%$);

B (II) – нормальный, рекомендуемый для использования в помещениях домов, строящихся или реконструирующихся ($PPD < 10 \%$);

C (III) – допустимый, рекомендуемый для эксплуатируемых помещений домов ($PPD < 15 \%$);

D (IV) – достаточный, рекомендуемый для помещений, используемых ограниченно промежуток времени в течение года ($PPD > 15 \%$).

Европейские нормы уделяют особое внимание качеству внутреннего воздуха, что обусловлено внутренним загрязнением. Удельные (на человека или на квадратный метр площади помещения) нормы вентиляционного воздуха для помещений делятся на три уровня загрязненности внутреннего воздуха:

- самый низкий – для зданий, интерьер которых выполнен только из натуральных традиционных материалов: камень, стекло; материалы с уровнем выделения загрязняющих веществ: летучие органические соединения – до 0,1 мг/м³ч, формальдегид – 0,02 мг/м³ч, аммиак – до 0,01 мг/м³ч, канцерогены – до 0,002 мг/м³ч и материалов, степень недовольных запахом которых среди людей составляет до 10 %;

- низкий – для зданий, интерьер которых выполнен только из традиционных натуральных материалов, таких как: камень, стекло, материалы с уровнем выделения загрязняющих веществ: летучие органические соединения – до 0,02 мг/м³ч, формальдегид – до 0,05 мг/м³ч, аммиак – до 0,03 мг/м³ч, канцерогены – до 0,01 мг/м³ч и материалов, степень недовольных запахом которых среди людей составляет до 15 %;

- высокий – для зданий, которые не отвечают вышеперечисленным требованиям.

Такую оценку качества внутреннего воздуха принимают для зданий общественного назначения. При этом учитывается наличие курящих, для которых необходимо увеличивать кратность воздухообмена во всех помещениях.

Для жилых домов используется близкий к отечественной практике подход к проектированию, приведенный в ДБН В.2.2-15-2005 «Житлові будинки. Основні положення». За окончательный принимают воздухообмен, наибольший из расчетных по кратности или по расходам. В норме указано, что необходимо предусмотреть возможность понижения расхода воздуха в помещении при отсутствии людей. Указанные показатели воздухообмена принимают для строящихся и реконструируемых зданий. Они отличаются как в большую, так и в меньшую сторону от положений отечественных ДБН. В общем случае, нормированный воздухообмен по требованиям европейских норм меньше, чем по отечественным нормам. Это позволяет сократить расходы тепла с удаляемым вентиляционным воздухом. Тем более что с уменьшением потерь тепла через ограждающие конструкции увеличивается часть теплопотерь с вентиляционным воздухом в общем тепловом балансе здания.

ВЫВОДЫ

Учитывая, что комфортные параметры внутреннего микроклимата зависят от индивидуальных характеристик и требований людей, параметры внутреннего микроклимата должны иметь возможность индивидуального регулирования с целью соответствия субъективным ощущениям комфорта потребителя.

Современные параметры микроклимата помещений не учитывают всего комплекса физиологических воздействий, оказываемых воздушной средой помещения на организм человека, вследствие чего в основу нормирования необходимо заложить не просто санитарно-гигиенический, а комплексный физиологический подход с учетом существенно изменившихся на сегодняшний день интерьерной обстановкой, планировкой помещений, качеством применяемых современных строительных и отделочных материалов.

При этом для систем климатизации проводимые мероприятия по повышению энергетической эффективности не должны противоречить условиям обеспечения требуемого микроклимата помещений зданий, и в том числе условиям обеспечения качества внутреннего воздуха и нормальной физиологической температурной обстановки помещений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Olesen, B. Стандарты вентиляции и качества внутреннего воздуха: европейский и американский подходы [Текст] / B. Olesen // АВОК. – 2011. – № 5. – С. 18–25.
2. ДБН В.2.5-67:2013. Отопление, вентиляция и кондиционирование [Текст]. – Введ. 01.01.2014. – К. : Минрегион Украины, 2013. – 113 с.
3. Fanger, P. O. Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering [Текст] / Poul Ole Fanger. – Malabar, Florida, USA : R.E. Krieger Publish. Co., 1982. – 244 p. – ISBN 0-89874-446-6.
4. Богословский, В. Н. Отопление [Текст] : учебник для вузов / В. Н. Богословский, А. Н. Сканави. – М. : Стройиздат, 1991. – 735 с.
5. ДСТУ Б EN ISO 7730:2011. Ергономіка теплового середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD і критеріїв локального теплового комфорту [Текст]. – Введ. 01.01.2013. – К. : Мінрегіон України, 2012. – 66 с.

6. Брух, С. В. Три условия комфортности [Электронный ресурс] / С. В. Брух // Мир Климата. – 2004. – № 23. – Режим доступа : https://www.mir-klimata.info/archive/2004_2/tri_uslovija_komfortnosti.
7. Гошка, Л. Л. Энергосбережение и энергоэффективность климатических систем [Текст] / Л. Л. Гошка // Инженерно-строительный журнал. – 2010. – № 1. – С. 14–22.

Получено 11.09.2017

З. В. УДОВИЧЕНКО, О. В. МИХАЙСЬКА, М. Р. УДОВИЧЕНКО
НОРМУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ
ДОНБАСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

Анотація. У статті наведено загальний огляд європейських та міжнародних норм, що регламентують принципи нормування параметрів мікроклімату приміщень, а також дано аналіз і порівняльна характеристика вимог вітчизняних і міжнародних норм.

Ключові слова: мікроклімат приміщень, параметри мікроклімату, тепловий комфорт.

ZLATA UDOVICHENKO, OKSANA MIKHAISKAYA, NIKITA UDOVICHENKO
RATIONING OF MICROCLIMATE PARAMETERS
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The article gives a general overview of European and international norms regulating the principles of standardizing the parameters of the microclimate of premises, as well as analysis and comparative characteristics of the requirements of domestic and international standards.

Key words: microclimate of premises, microclimate parameters, thermal comfort.

Удовиченко Злата Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергосбережение в системах теплогазоснабжения и вентиляции.

Михайская Оксана Валентиновна – магистрант кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергосбережение в системах теплогазоснабжения и вентиляции.

Удовиченко Никита Ростиславович – магистрант 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 і вентиляції ДОНБАСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ. Наукові інтереси: енергозбереження в системах теплогазопостачання і вентиляції.

Михайська Оксана Валентинівна – магістрант кафедри теплотехніки, теплогазопостачання і вентиляції ДОНБАСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ. Наукові інтереси: енергозбереження в системах теплогазопостачання і вентиляції.

Удовиченко Микита Ростиславович – магістрант кафедри теплотехніки, теплогазопостачання і вентиляції ДОНБАСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ. Наукові інтереси: енергозбереження в системах теплогазопостачання і 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: heat saving in systems of a heat- gas supply and ventilation.

Mikhaiskaya Oksana – master's student, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: heat saving in systems of a heat- gas supply and ventilation.

Udovichenko Nikita – master's student, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: heat saving in systems of a heat- gas supply and ventilation.

УДК 628.3

**Н. Г. НАСОНКИНА^а, В. В. МАРКИН^{а, б}, С. Е. АНТОНЕНКО^а, Э. И. ЖУКОВ^б, М. В. МАРОЗЮК^б,
Е. И. ПИЛИПЕНКО^а, П. Г. БЕРЕЗА^а**^а ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», ^б КП «Компания "Вода Донбасса"»

СТРАТЕГИЯ ОЦЕНКИ РИСКА И МОДЕРНИЗАЦИИ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Аннотация. Для получения четкой картины состояния систем водоотведения следует использовать комплексную оценку экологической безопасности очистных сооружений. В статье предложена модель выбора метода реконструкции канализационных очистных сооружений и методика расчета интенсификации работы сооружений с помощью пробиотиков.

Ключевые слова: экологическая безопасность, канализационные очистные сооружения, качество воды, пробиотик.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

В комплексе мероприятий по защите поверхностных источников водоснабжения эффективнейшим является устройство централизованных систем водоотведения с надежными очистными сооружениями [1, 2]. Следует отметить, что на современном этапе развития общества, в условиях глобальных изменений хозяйственной деятельности человечества, произошли и продолжают происходить существенные изменения состава и характера загрязненности хозяйственно-бытовых сточных вод. В городских стоках повышается содержание загрязнений техногенного характера, относящихся к категории ксенобиотиков, повышается содержание азота и фосфора.

Совокупность всех этих факторов негативно влияет на работу канализационных очистных сооружений. Традиционные технологии очистки сточных вод в этих условиях не способны обеспечить устойчивое и надежное протекание процессов биодеструкции загрязняющих веществ и соответственно достичь новых, более жестких нормативов очистки сточных вод и выбросов в окружающую среду. Например, только по Донецкой области практически все города и поселки городского типа имеют централизованную систему канализации. Очистка сточных вод на большинстве сооружений осуществляется по традиционной схеме: механическая обработка, биологическая очистка в аэротенках и вторичных отстойниках. Техническое состояние практически всех канализационных очистных сооружений нуждается в их модернизации или реконструкции. И если на больших сооружениях модернизация вызвана необходимостью замены отдельного изношенного или морально устаревшего оборудования, то на небольших станциях положение во многих случаях катастрофическое. Половина сточных вод, прошедших очистку на малых канализационных сооружениях, не отвечает не только стандартам, но и временно установленным нормативам (рисунок 1).

Состав сточных вод Донбасса, а именно содержание в них солей тяжелых металлов, в большинстве населенных пунктов региона делает канализационные осадки практически непригодными для использования в качестве удобрений в сельском хозяйстве.

Приведенные технические характеристики систем водоотведения свидетельствуют о кризисном положении системы и необходимости ее реформирования.

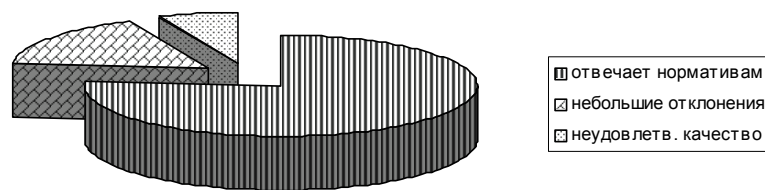


Рисунок 1 – Качество очистки сточных вод по Донецкой области.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Разработать модель комплексной оценки состояния канализационных очистных сооружений с учетом экологического и экономического риска и предложить схемы его снижению.

Оперативное управление процессами обеспечения надежности канализационных очистных сооружений нередко сопряжено с проблемами выбора управленческих решений в условиях быстрого и глубокого изменения факторов, влияющих на очистку сточных вод и обработку осадков. Для объективного и оперативного реагирования на негативные изменения этих факторов недостаточно данных мониторинговых наблюдений. Большое значение имеет возможность быстрого анализа потенциальных сценариев развития кризисных ситуаций и выбора наиболее подходящего (по экономическим и экологическим признакам) варианта управленческих решений.

Для получения количественной характеристики качества воды по набору показателей довольно часто применяют методы экспертных оценок [3, 4]. Полученные данным методом абсолютные оценки меняются скачкообразно, что не отражает особенностей рассматриваемого явления.

Анализ методов оценки качества воды показывает, что необходимо дальнейшее развитие исследований в этой области.

В управлении качеством воды в системах водоотведения одним из основных является системный принцип. Координирующим вектором системной модели служить использование интегральных показателей состояния элементов системы (рисунок 2). По величине приближения мер к тому или иному нормативу осуществляется оценка надежности и экологической безопасности системы.

При получении результата «катастрофическое» проводится переоценка технологии очистки и обработки осадков.

В ходе натурных исследований оценивалось влияние илоотстойников на окружающую среду (по качеству воздуха и грунтовых вод).

В процессе окисления и микробиологического распада осадков в анаэробных условиях выделяются сероводород, аммиак, окислы углерода. При эмиссии данных газов в атмосферный воздух, происходит их постепенное окисление к серистому ангидриду, двуокиси азота и двуокиси углерода. В таблице 1 по данным районной СЕС приведена количественная оценка показателей загрязнения (далее ПЗ). Рассмотрим более детально поэтапную оценку критериев на примере подсистемы «блок обработки осадков канализационных очистных сооружений».

Предназначена подсистема «Канализационные очистные сооружения» для оценки работы очистных сооружений по критериям возможности загрязнения сточной воды во время очистки и загрязнения окружающей среды, образующимися отходами. Состояние подсистемы по «Качеству образующихся осадков» оценивается множеством логических альтернатив $O_i \in O$ экологической безопасности осадков и их влияния на окружающую среду. При изучении каждого показателя установлено, что множество альтернатив состояний может быть представлено вектором: $O = (O_3, O_2, O_1) = / \text{«катастрофическое»}, \text{«очень плохое»}, \text{«удовлетворительное»} /$, компоненты которого определяются логической функцией (1):

$$O(f_i) = \begin{cases} O_3, \text{если } L_0^i \leq f_i < L_1^i; \\ O_2, \text{если } L_1^i \leq f_i < L_2^i; \\ O_1, \text{если } L_2^i \leq f_i < L_3^i; \end{cases} \quad (1)$$

$i \in /1, 3/$,

где L_n^i – критерии оценки показателей загрязненности осадков.

Для оценки подсистемы вводится логическая функция степени утилизации осадков (2):

$$\varphi_k(O_i) = \begin{cases} -3, \text{если } O_i = O_3; \\ -1, \text{если } O_i = O_2; \\ 0, \text{если } O_i = O_1; \end{cases} \quad (2)$$

$k \in /1,3/.$

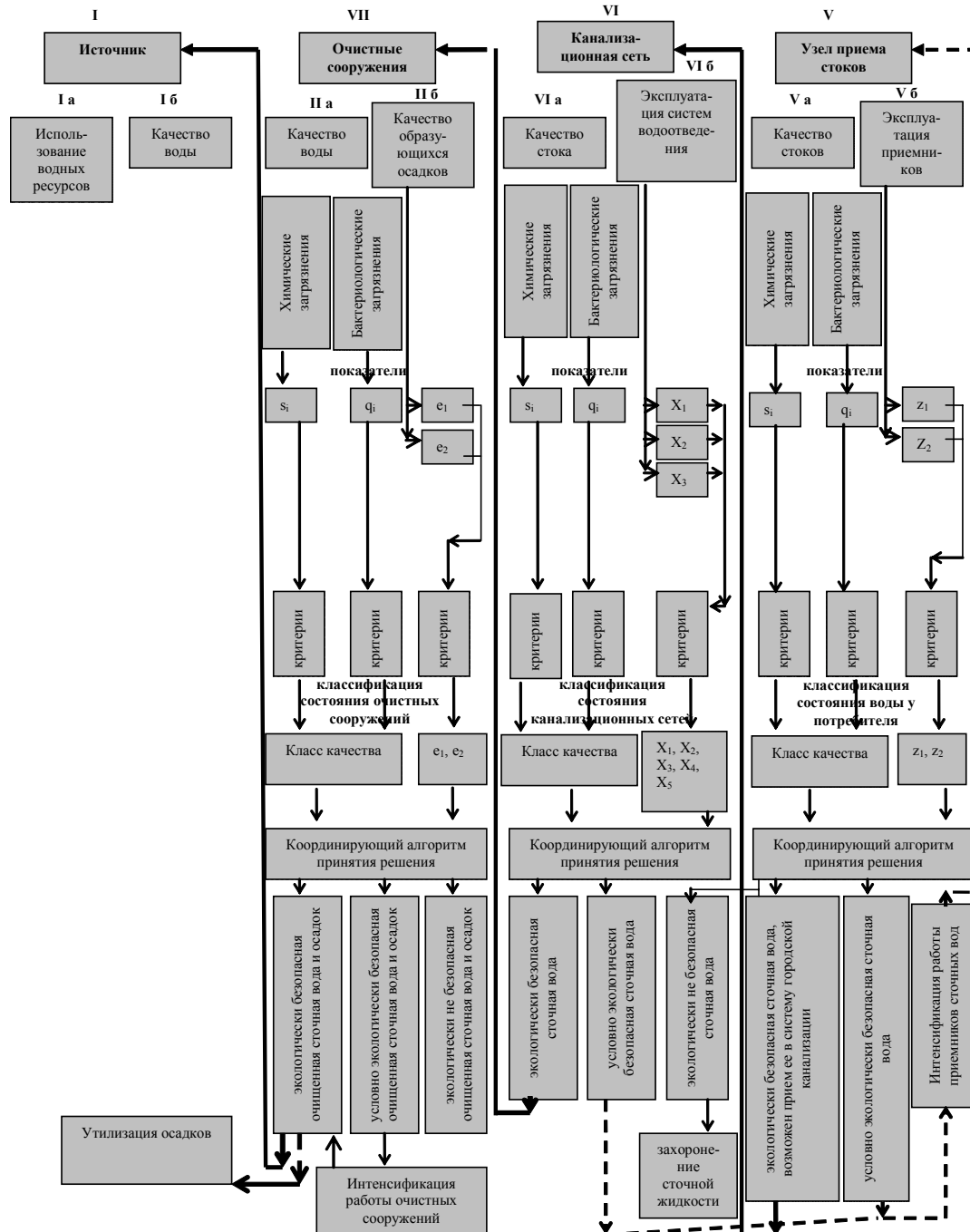


Рисунок 2 – Структурная схема системной логико-математической модели – система водоотведения.

Мера и значение класса определяется выражением (3):

$$W = \arg \min \{ \varphi(O_i) \}. \quad (3)$$

Состояние работы очистных сооружений оценивается по количеству и качеству образующихся осадков, а также по мере их утилизации.

Таблица 1 – Оценка степени загрязненности атмосферного воздуха

Расстояние от границы отстойников, м	ПЗ CO	ПЗ NO ₂	ПЗ SO ₂	ПЗ H ₂ S	ПЗ NH ₃	ІЗА	ΣПЗ, %	ПЗ H ₂ S+ ПЗ NH ₃
30	0,38	0,12	0,48	2,63	1,70	6,04	616	4,33
100	0,36	0,12	0,28	1,00	1,25	3,06	304	2,25
500	0,20	0,12	0,04	0,63	0,65	2,37	238	1,28

Основной взнос на степень суммарного загрязнения вносят аммиак и сероводород. Ореолы рассеивания аммиака отвечают слабо опасной степени загрязненности со стороны иловых отстойников. Сероводород образует умеренноопасный и слабо опасный уровень загрязнения (рис. 3). Показатель суммарного действия аммиака и сероводорода, превышающих норматив, установлен на всей исследуемой территории.

Основным фактором возможного загрязнения грунтов со стороны отстойников является ветровое рассеивание пылегазовых выбросов. В процессе осаждения компонентов выбросов на земную поверхность образуются вторичные ореолы рассеивания в грунтах. Основными компонентами выбросов со стороны отстойников является сероводород и аммиак. В процессе окисления этих газов может образовываться двуокись серы и окислы азота. При этом двуокись серы может локализоваться в слое почвы в виде различных сульфатов, основным из которых является гипс. Локальное загрязнение грунтов со стороны отстойников возможно в процессе запыления в засушливый и морозный периоды года, когда ветровой эрозии подвергаются сухие пляжи осадков.

На большей части территории очистных сооружений наблюдается допустимый уровень загрязнения грунтов (рисунок 3). Увеличение степени загрязненности наблюдается по мере приближения к отстойникам. Осадки отвечают чрезвычайноопасной степени загрязнения. Ореол пылевого рассеивания распространяется на первые десятки метров от границ отстойников. В загрязнение почв вносят существенный вклад такие элементы как серебро, свинец, ртуть, цинк и мышьяк, в меньшей степени медь.

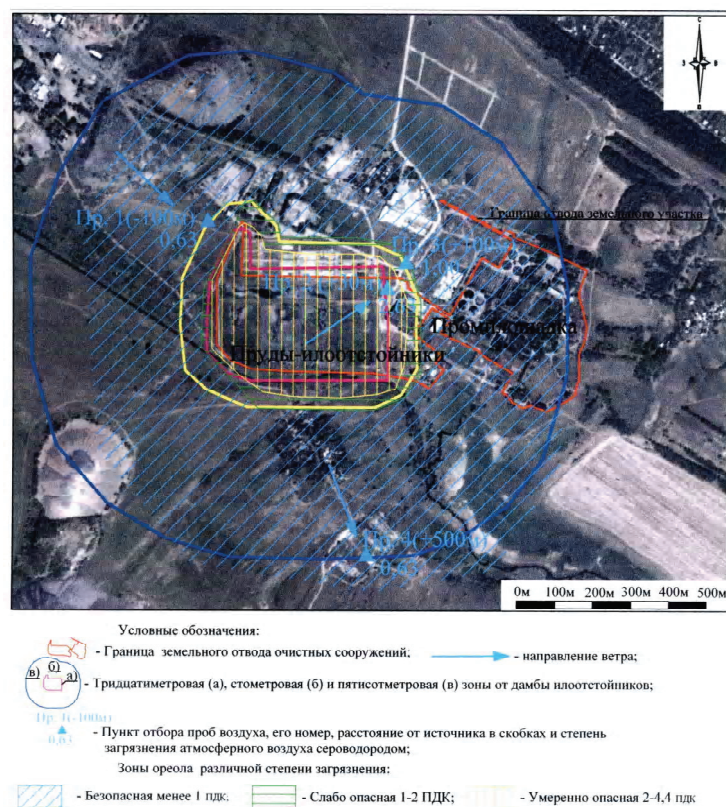


Рисунок 3 – Зона влияния отстойников.

Серебро является индикаторным элементом отходов, которые образуются в процессе очистки стоков. Его концентрация в отстойниках достигает 7 мг/кг, что в 155,6 раз превышает геофон.

В отходах отмечаются незначительные аномальные концентрации свинца, которые превышают фон в 2,35 раза, мышьяка – в 3,89 раза, цинк – в 4 раза (табл. 2).

Таблица 2 – Степень загрязненности почво-грунтов

Кадмий	Медь	Никель	Ртуть	Свинец	Цинк	Марганец	Сульфаты	Мышьяк	Сера п.ф.
0,00013	0,87	0,33	0,15	1,47	2,80	0,46	25,68	3,70	1,09

Техногенный водоносный горизонт отстойников имеет прямую гидравлическую связь с нижезалегающими грунтовыми водами. Он формируется за счет инфильтрации атмосферных осадков, фильтрационных потерь из гидротехнических сооружений и коммуникаций. Под действием силы притяжения эти воды просачиваются через осадки и попадают в подстилающие подземные водоносные горизонты. Загрязненные грунтовые воды вклиниваются в реки и негативно влияют на состав природной воды, которая является источником водоснабжения (рис. 4).

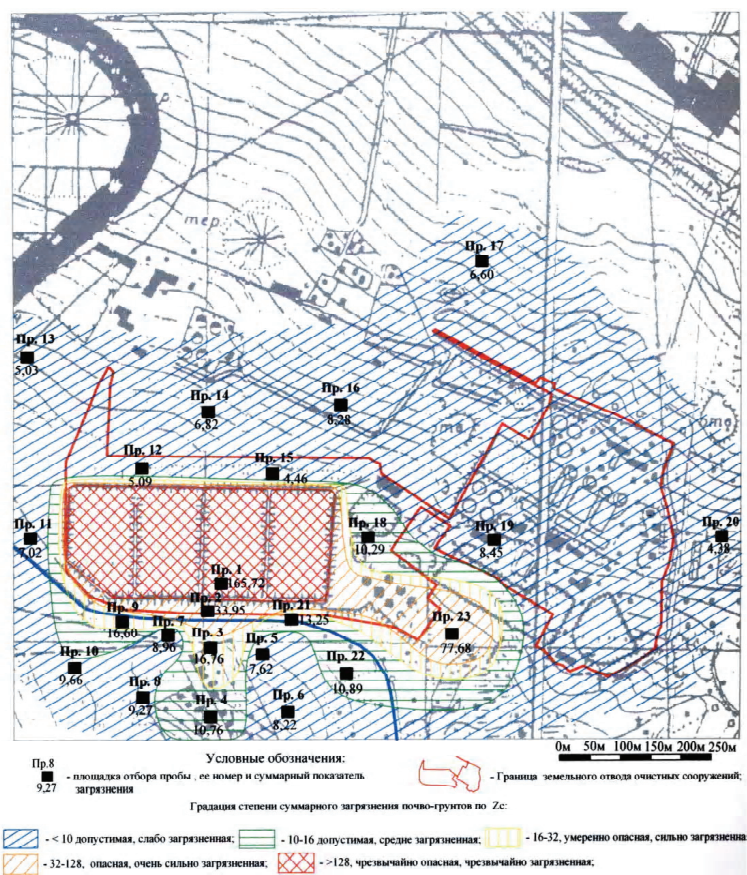


Рисунок 4 – Карта суммарного загрязнения почво-грунтов.

В необеззараженных сточных водах, а соответственно и в воде отстойников, находятся различные патогенные вирусы, которые распространяются дальше грунтовыми водами в поверхностные водоемы.

Важным фактором, что определяет эпидемиологическую опасность профильтрованной воды из иловых отстойников, является жизнестойкость патогенных микроорганизмов и вирусов в сточной воде.

Длительность выживания энтеровирусов в сточных водах обеспечивается за счет действия белковых компонентов.

Для снижения уровня опасности предлагается использовать пробиотические препараты (пробиотики).

Пробиотики, предназначенные для применения в области очистки сточных вод, способны интенсифицировать процессы механической и биологической очистки, снижать количество осадков, уменьшать выделение токсичных газов из сточной воды и, соответственно, снижать уровень запаха.

В состав пробиотиков входят штаммы пробиотических бактерий и различные ферменты. Согласно определению ВОЗ пробиотические препараты должны быть непатогенными, нетоксичными, обладать высокой адгезивной и антагонистической способностью к патогенным и условно-патогенным микроорганизмам.

Основными пробиотиками являются непатогенные спорообразующие микроорганизмы, в основном рода *Bacillus*, а также бактерии родов *Bifidobacterium*, *Lactobacillus*, *Enterococcus*, *Aerococcus* и сахаромикеты.

Пробиотические бактерии вырабатывают антибактериальные вещества и являются антагонистами в отношении болезнетворных патогенов, способны производить широкий спектр ферментов, расщепляющих органические вещества. При попадании в питательную среду они поглощают субстрат, не оставляя патогенным микроорганизмам возможности для развития. Быстрое разрушение органических веществ в сточных водах позволяет существенно снизить анаэробные процессы, которые сопровождаются выделением неприятных запахов и токсичных газов (аммиака, сероводорода, метана).

Одним из наиболее перспективных пробиотических препаратов является «Оксидол» (Agranco corp.). В его состав входят бактерии родов: *Bifidobacterium Longum*, *Bifidobacterium Thermophilum*, *Bacillus Subtilis*, *Lactobacillus Acidophilus*, а также ферменты: целлюлаза, протеаза, амилаза, пектиназа и фитаза.

Особенностью применения пробиотиков является их введение с начальной (максимальной) дозы и последующее постепенное снижение дозировки до минимального значения с сохранением увеличенного эффекта очистки. Оптимальный диапазон начальной дозы «Оксидола» – 0,2÷0,4 г/м³, минимальное значение – 0,04 г/м³.

Пробиотики целесообразно вводить перед первичными отстойниками, так как это позволит уменьшить объем сырых осадков, частично их стабилизировать и снизить бактериальную загрязненность.

Введение «Оксидола» интенсифицирует первичное отстаивание по взвешенным веществам (ВВ) и БПК и биологической очистки по взвешенным веществам, БПК, и азоту аммонийному (АА).

Повышение эффекта первичного отстаивания $\Delta\mathcal{E}_{\text{отст}}$ и биологической очистки $\Delta\mathcal{E}_{\text{биол.}}$ можно вычислить по формулам:

– первичного отстаивания по взвешенным веществам:

$$\Delta\mathcal{E}_{\text{отст.}(ВВ)} = -2,91 + 33,7d + 0,244t, \quad \%, \quad (5)$$

где d – доза пробиотика, г/м³,
 t – температура сточной воды, °C,

– первичного отстаивания по БПК₅:

$$\Delta\mathcal{E}_{\text{отст.}(БПК_5)} = 6,13 + 35,7d + 0,358t, \quad \%, \quad (6)$$

– биологической очистки по БПК₅:

$$\Delta\mathcal{E}_{\text{биол.}(БПК_5)} = 0,735 - 0,4d - 0,118t + 7,82q_{БПК_5} + 1,5dt, \quad \%, \quad (7)$$

где $q_{БПК_5}$ – нагрузка на активный ил по БПК₅, кгО₂/(кг·сут),

– биологической очистки по взвешенным веществам:

$$\Delta\mathcal{E}_{\text{биол.}(ВВ)} = 2,315 - 12,4d - 0,136t + 8,7q_{ВВ} + 2,38dt, \quad \%, \quad (8)$$

где $q_{ВВ}$ – нагрузка на активный ил по взвешенным веществам, кг/(кг·сут),

– биологической очистки по азоту аммонийному:

$$\Delta\mathcal{E}_{\text{биол.}(NH_4)} = -69,29 + 42,6d - 4,35t + 0,668q_{N-NH_4} - 0,034tq_{N-NH_4}, \quad \%, \quad (9)$$

где q_{N-NH_4} – нагрузка на активный ил по азоту аммонийному, гN/(кг·сут).

По полученным приростам эффективности можно определить расчетные увеличенные значения эффекта первичного отстаивания $\mathcal{E}_{\text{отст.расч}}$ и биологической очистки $\mathcal{E}_{\text{биол.расч}}$, расчетные концентрации загрязнений и составить блок-схему работы очистного комплекса до введения пробиотика и при его использовании (рисунок 5).



Рисунок 5 – Блок-схема интенсификации первичного отстаивания и биологической очистки с помощью пробиотика «Оксидол».

При введении «Оксидола» влажность сырого осадка снижается примерно на 3 %, что соответственно приводит к значимому сокращению его объема, а также уменьшается прирост активного ила.

Наблюдение за приростами биомассы ила P_i в аэротенке при введении пробиотика начальной дозой 0,3 г/м³ и статистическая обработка данных позволили получить уравнение прироста:

$$P_i = 0,62C_{\text{сдр}} + 0,20L_{\text{ен}} - C_{\text{взв.в-ва}}, \text{ мг/дм}^3, \quad (10)$$

где $C_{\text{сдр}}$ – концентрация взвешенных веществ в сточной воде, поступающей в аэротенк, мг/дм³,
 $L_{\text{ен}}$ – БПК_п в сточной воде, поступающей в аэротенк, мгО₂/дм³,
 $C_{\text{взв.в-ва}}$ – концентрации взвесей в сточной воде на выходе из вторичного отстойника.

Как видим, коэффициенты в полученной модели значительно меньше по сравнению с формулой СНиП 2.04.03-35 [10]:

$$P_i = 0,8C_{\text{сдр}} + 0,3L_{\text{ен}}, \text{ мг/дм}^3. \quad (11)$$

Уровень запаха в первичных отстойниках в результате подачи «Оксидола» снижается с 5 до 2–3 баллов. Уменьшается бактериальная загрязненность: коли-индекс и общее микробное число снижается на 2–3 порядка.

Стоимость обработки 1 м³ сточной жидкости «Оксидолом» дозой 0,3 г/м³ равна 2,46 руб., дозой 0,04 г/м³ – 0,34 руб.

Таким образом, применение пробиотических препаратов способно повысить эффективность и экологическую безопасность канализационных очистных станций.

ВЫВОДЫ

Для получения наиболее детализированной картины состояния систем водоотведения следует использовать комплексную оценку экологической безопасности систем. Особое значение эта оценка может иметь при необходимости срочного устранения негативных изменений, произошедших в системе, и при разработке программы мер, направленных на повышение надежности систем водоотведения городов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Насонкина, Н. Г. Повышение экологической безопасности систем питьевого водоснабжения [Текст] / Н. Г. Насонкина. – Макеевка : ДонНАСА, 2005. – 181 с.
- Технология глубокой биологической очистки сточных вод в модульных комбинированных колонных и коридорных биореакторах [Текст] / С. В. Яковлев, А. А. Свердликов, Г. П. Щербина [и др.] // Сучасні технології та

- устаткування для інтенсифікації роботи систем водопостачання і водовідведення України : Збірник доповідей науково-практичної конференції 23–24 березня, 1999 р. / Киевский национальный университет строительства и архитектуры. – К. : КНУБА, 1999. – С. 31–35.
3. Марголина, С. М. О количественной оценке степени загрязнения водоемов токсичными веществами [Текст] / С. М. Марголина, Г. М. Рохлин // Управление природной средой / АН СССР, Центральный научно-исследовательский экономический институт ; Отв. ред. М. Я. Лемешев, Л. В. Дунаевский. – М. : Наука, 1979. – С. 19–23.
 4. Тютков, О. В. Оптимизация планирования водного хозяйства промышленных районов [Текст] / О. В. Тютков. – М. : Наука, 1985. – 215 с.
 5. Lowen, S. B. Fractal renewal processes generate I/f noise [Текст] / S. B. Lowen, M. C. Teich // Physical Review. E. – 1993. – Vol. 47, № 2. – P. 992–1001.
 6. Maslov, S. Avalanches and I/f noise in evolution and growth models [Текст] / S. Maslov, M. Paczuski, P. Bak // Physical Review Letters. – 1994. – Vol. 73, № 16. – P. 2162–2165.
 7. Водоснабжение [Текст] / А. Я. Найманов, С. Б. Никиша, Н. Г. Насонкина [и др.]. – Донецк : Норт-Пресс, 2004. – 649 с.
 8. Порфирьев, Б. Н. Экологическая экспертиза и риск технологий [Текст] / Б. Н. Порфирьев ; под ред. Д. А. Криволицкого ; ВИНТИ. – М. : ВИНТИ, 1990. – 200 с. – (Итоги науки и техники. Серия «Охрана природы и воспроизводство природных ресурсов»).
 9. Nasonkina, N. Systems analysis of estimation of ecological safety of the systems of water and sewage economy [Текст] / N. Nasonkina, V. Sashnovskay // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2009. – Т. 5, № 3. – С. 114–123.
 10. Строительные нормы и правила. Канализация. Наружные сети и сооружения [Текст] : СНиП 2.04.03-85 : [Утв. Гос. ком. СССР по делам стр-ва 21.05.85 : Взамен СНиП II-32-74 : Срок введ. в действие 01.01.86]. – Изд. офиц. – М. : Госстрой СССР, 1986. – 72 с.

Получено 08.10.2017

Н. Г. НАСОНКІНА ^a, В. В. МАРКІН ^{a, b}, С. Є. АНТОНЕНКО ^a, Е. І. ЖУКОВ ^b,
М. В. МАРОЗЮК ^b, К. І. ПИЛИПЕНКО ^a, П. Г. БЕРЕЗА ^a
СТРАТЕГІЯ ОЦІНКИ РИЗИКУ І МОДЕРНІЗАЦІЇ КАНАЛІЗАЦІЙНИХ
ОЧИСНИХ СПОРУД

^a ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури», ^b КП «Компанія "Вода Донбасса"»

Анотація. Для отримання чіткої картини стану систем водовідведення слід використовувати комплексну оцінку екологічної безпеки очисних споруд. У статті запропонована модель вибору методу реконструкції каналізаційних очисних споруд та методика розрахунку інтенсифікації роботи споруд за допомогою пробіотиків.

Ключові слова: екологічна безпека, каналізаційні очисні споруди, якість води, пробіотик.

NADIY NASONKINA ^a, VYACHESLAV MARKIN ^{a, b}, SVETLANA ANTONENKO ^a,
EDUARD ZHUKOV ^b, MARIY MAROZUKE ^b, EKATERINA PILIPENKO ^a,
PAVEL BEREZA ^a
STRATEGY OF ASSESSMENT OF RISK AND MODERNIZATION OF SEWER
TREATMENT FACILITIES

^a Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, ^b ME «Company "Water of Donbass"»

Abstract. The complex estimation of safety must be applied for the estimation of the state of sewages cleansing buildings. In the article the methods of choice of chart of reconstruction of sewages cleansing buildings and calculation of intensification of work of buildings have been offered by the probiotic.

Key words: ecological safety, sewer treatment facilities, quality of water, probiotic.

Насонкина Надежда Геннадьевна – доктор технических наук, профессор кафедры городского строительства и хозяйства ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: системы водоснабжения и водоотведения, экологическая безопасность систем водоснабжения.

Маркин Вячеслав Владимирович – магистр кафедры городского строительства и хозяйства ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»; инженер-технолог КП «Компания "Вода Донбасса"». Научные интересы: очистка сточных вод.

Антоненко Светлана Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент кафедры городского строительства и хозяйства ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: электрохимическое умягчение воды, новые материалы и оборудование при проектировании систем отопления.

Жуков Эдуард Иванович – начальник лаборатории наладки водопроводных сооружений и сетей КП «Компания "Вода Донбасса"», центральная контрольно-исследовательская и проектно-изыскательская водная лаборатория. Научные интересы: очистка природных вод, физико-химическая очистка воды.

Марозюк Марья Владимировна – начальник отдела КП «Компания "Вода Донбасса"». Макеевский горводоканал. Научные интересы: очистка сточных вод, экобезопасность.

Пилипенко Екатерина Игоревна – студентка ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: системы водоснабжения и водоотведения.

Берёза Павел Георгиевич – ассистент кафедры городского строительства и хозяйства ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: инновационные технологии в отоплении, вентиляции и кондиционировании.

Насонкіна Надія Геннадіївна – доктор технічних наук, професор кафедри міського будівництва та господарства ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: системи водопостачання і водовідведення, екологічна безпека систем водопостачання.

Маркін В'ячеслав Володимирович – магістр кафедри міського будівництва та господарства ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»; інженер-технолог КП «Компанія "Вода Донбасу"». Наукові інтереси: очищення стічних вод.

Антоненко Світлана Євгенівна – кандидата технічних наук, доцент кафедри міського будівництва та господарства ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: електрохімічне зм'якшення води, нові матеріали і устаткування при проектуванні систем опалення.

Жуков Едуард Иванович – керівник лабораторії налагодження водопровідних споруд і мереж КП «Компанія "Вода Донбасу"», центральна контрольно-дослідна та проектно-вишукувальна водна лабораторія. Наукові інтереси: очищення природних вод, фізико-хімічне очищення води.

Марозюк Марія Володимирівна – начальник відділу КП «Компанія "Вода Донбасу"». Макіївський міськводоканал. Наукові інтереси: очищення стічних вод, екобезпека.

Пилипенко Катерина Ігорівна – студентка ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: системи водопостачання та водовідведення.

Береза Павло Георгійович – асистент кафедри міського будівництва та господарства ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: інноваційні технології в опаленні, вентиляції та кондиціонування, системи водопостачання та водовідведення.

Nasonkina Nadiy – Sc. D. (Eng.), Professor, Municipal Building and Economy Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: water and wastewater treatment, ecological safety of the water systems.

Markin Vyacheslav – Master; Municipal Building and Economy Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture; engineering-tehnology of the ME «Company "Water of Donbas"». Scientific interests: wastewater treatment.

Antonenko Svetlana – Ph. D. (Eng), Associate Professor, Municipal Building and Economy Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: electrochemical softening the waters, new materials and the equipment at designing of systems of heating.

Zhukov Eduard – the Head of the laboratory commissioning of water supply facilities and networks ME «Company "Water of Donbas"», the Central control and research and development water laboratory. Scientific interests: natural waters treatment, physical and chemical water treatment.

Marozuke Mariy – the Head of the department, ME «Company "Water of Donbas"». Water department of city of Makeevka. Scientific interests: water of sewages, ecology.

Pilipenko Ekaterina – student, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: system of water supply and sanitation.

Bereza Pavel – assistant, Municipal Building and Economy Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: innovative technology for heating, ventilation and air-conditioning, system of water supply and sanitation, system of water supply and sanitation.

УДК 628.16

Г. С. ТУРЧИНА

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

**МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ НАДЕЖНОСТИ С
УЧЕТОМ ЗНАЧИМОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ В КОЛЬЦЕВЫХ СИСТЕМАХ
ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

Аннотация. Статья посвящена проблеме учета неравнозначности различных участков трубопроводов в кольцевой системе подачи и распределения воды при расчете параметрической надежности. Предложена методика нахождения показателей безотказной работы с учетом влияния значимости участков трубопроводов.

Ключевые слова: надежность, вероятность безотказной работы, кольцевая водопроводная сеть, алгебра логики, мостиковые системы.

Рассматривая систему подачи и распределения воды (СПРВ) с точки зрения составления параллельно-последовательной схемы для решения с применением теории вероятности, можно столкнуться с определенными проблемами [2]. Систему подачи и распределения воды можно рассматривать как с точки зрения непосредственно подачи (забор воды из сети), так и транспортирования (т. е. воду нужно донести до определенного участка посредством перемещения через другие). Также любую кольцевую систему подачи и распределения воды можно рассматривать как мостиковую – с точки зрения алгебры логики [8, 9, 14]. Помимо отсутствия четкой нормативной базы [6, 11, 12, 16, 17] в этих вопросах, в научной сфере также плохо раскрыты данные темы.

В алгебре логики есть подходящий метод расчета под такие задачи – метод минимальных сечений, где «минимальным сечением» является связка элементов, работоспособное состояние которых обеспечивает заданное по условию работоспособное состояние системы, при этом совсем не обязательно в группу входят все элементы системы. Решение всех возможных связей элементов, в совокупности обеспечивающих работоспособное состояние для конкретной задачи, является значением конечной вероятности работоспособного состояния всей системы.

Чтобы в случае приведения кольцевой сети подачи и распределения воды к схеме последовательно-параллельных соединений последняя смогла более шире и точнее учитывать некоторые функциональные и конструктивные особенности, было предложено рассматривать математическую модель СПРВ как совокупность параметрической (функциональной), конструктивной и эксплуатационной (обслуживание системы) надежности.

Как уже было представлено выше, функциональная надежность обеспечивает основные функции – транзит и забор воды из системы с требуемыми параметрами. Согласно нормам подача воды от расчетной должна составлять не менее 70 %. При этом следует также учитывать, что, в отличие от конструктивной надежности, где рассматривается надежность самого элемента и влияющих на нее факторов, понижение количества воды, подаваемой на участке, может быть вследствие не только поломки самого участка, но и снижения подачи воды на смежных участках или отсутствия возможности подачи дополнительного количества воды через другие участки из-за недостаточной запроектированной площади сечения труб. Таким образом, при построении схемы функциональной надежности СПРВ (рис. 1) трубопровод и смежные с ним участки следует соединять параллельно, создавая таким образом как бы функциональную единицу, ведь сказаться на параметрах трубопровода может снижение подачи воды на смежных участках, однако отказ только одного из них, при условиях

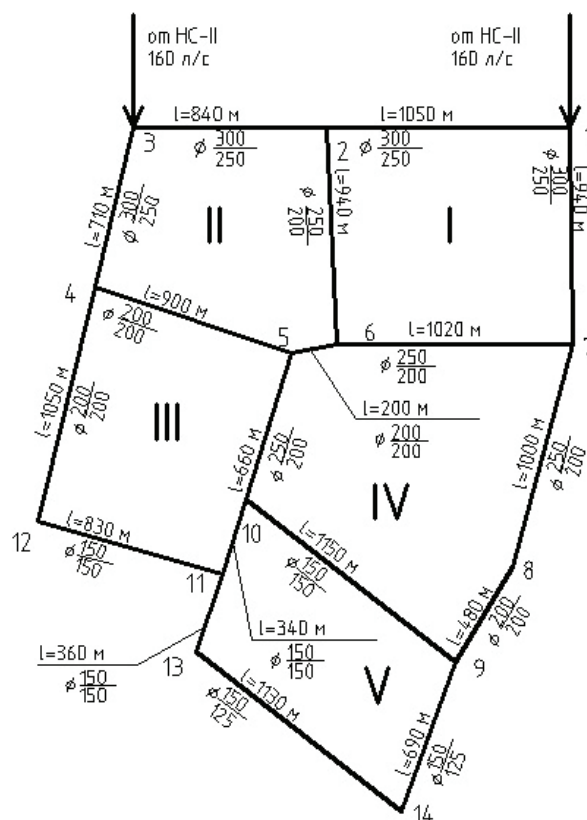


Рисунок 1 – Схема водопроводной сети.

резервирования пропускной способности, не приведет к отказу всей подсистемы. При этом, согласно нормативной документации, подача воды на любом уз участках ниже от расчетной более чем на 30 % считается отказом систем.

Для проведения расчета удобней воспользоваться обозначениями, принятыми в алгебре логики, где параллельное соединение можно выразить в виде дизъюнкций (логический оператор «или», \vee), а последовательное – конъюнкций (логический оператор «и», \wedge) (табл. 1, 2).

Отобразив всю последовательность соединений участков рисунка 1 с помощью конъюнкций и дизъюнкций, согласно алгебре логики, получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} & (P_{1-2} \vee P_{1-7} \vee P_{2-3} \vee P_{2-6}) \wedge (P_{1-2} \vee P_{2-3} \vee P_{2-6} \vee P_{3-4}) \wedge (P_{1-7} \vee P_{1-2} \vee P_{6-7} \vee P_{7-8}) \wedge (P_{2-6} \vee P_{1-2} \vee P_{2-3} \vee P_{6-7} \vee P_{5-6}) \wedge \\ & \wedge (P_{3-4} \vee P_{2-3} \vee P_{4-5} \vee P_{4-12}) \wedge (P_{4-5} \vee P_{3-4} \vee P_{5-6} \vee P_{5-10} \vee P_{4-12}) \wedge (P_{5-6} \vee P_{2-6} \vee P_{6-7} \vee P_{4-5} \vee P_{5-10}) \wedge (P_{6-7} \vee P_{1-7} \vee P_{7-8} \vee \\ & \vee P_{2-6} \vee P_{5-6}) \wedge (P_{7-8} \vee P_{1-7} \vee P_{6-7} \vee P_{8-9}) \wedge (P_{8-9} \vee P_{7-8} \vee P_{9-10} \vee P_{9-14}) \wedge (P_{4-12} \vee P_{3-4} \vee P_{4-5} \vee P_{11-12}) \wedge (P_{11-12} \vee \\ & \vee P_{4-12} \vee P_{10-11} \vee P_{11-13}) \wedge (P_{5-10} \vee P_{5-6} \vee P_{4-5} \vee P_{9-10} \vee P_{10-11}) \wedge (P_{10-11} \vee P_{5-10} \vee P_{9-10} \vee P_{11-12} \vee P_{11-13}) \wedge (P_{9-10} \vee \\ & \vee P_{5-10} \vee P_{10-11} \vee P_{8-9} \vee P_{9-14}) \wedge P_{9-14} \vee P_{8-9} \vee P_{9-10} \vee P_{13-14}) \wedge (P_{13-14} \vee P_{9-14} \vee P_{11-13}) \vee (P_{11-13} \vee P_{10-11} \vee P_{11-12} \vee \\ & \vee P_{13-14}). \end{aligned} \quad (1)$$

Дальнейшее решение производим согласно формулам теории вероятности [1].

Параметр вероятности безотказной работы: а) для двух параллельно соединенных элементов; б) для последовательного соединения элементов:

$$а) P_{a,b} = 1 - [(1 - P_a) \cdot (1 - P_b)]; \quad (2)$$

$$б) P_{a,b} = P_a \cdot P_b. \quad (3)$$

Для расчета были приняты два вида материала – чугун (значение диаметра на рисунке над чертой) и пластик (значение диаметра на рисунке под чертой).

В результате получили следующие значения:

Таблица 1 – Результаты расчета показателей надежности участков кольцевой сети (для $t = 1$ год) из чугунных труб ($\lambda = 0,43$ 1/км·год, $\mu = 175$ 1/год [13])

№ уч.	d , мм	l , км	$q_{\text{пут.}}$, л/с	$P_i = e^{-\lambda l t}$	$K_{\pi} = \mu / \mu + \lambda l_i$
1	2	3	4	7	10
1–2	300	1,05	22	0,636702	0,997427
1–7	300	0,94	20	0,667539	0,997696
6–7	250	1,02	22	0,644968	0,997500
2–6	250	0,94	21	0,667539	0,997696
5–6	200	0,2	5	0,917602	0,999509
4–5	200	0,9	20	0,679118	0,997793
3–4	300	0,71	15	0,736926	0,998258
2–3	300	0,84	18	0,696866	0,997940
5–10	250	0,66	15	0,752939	0,998381
10–11	150	0,34	9	0,863998	0,999165
11–12	150	0,83	18	0,699868	0,997965
4–12	200	1,05	22	0,636702	0,997427
7–8	250	1	22	0,650538	0,997549
8–9	200	0,48	14	0,813525	0,998822
9–10	150	1,15	26	0,609907	0,997182
9–14	150	0,69	15	0,743290	0,998307
13–14	150	1,13	26	0,615174	0,997231
11–13	150	0,36	10	0,856600	0,999116
Σ		14,29			

Таблица 2 – Результаты расчета показателей надежности участков кольцевой сети (для $t = 1$ год) из полиэтиленовых труб ($\lambda = 0,02$ 1/км·год, $\mu = 175$ 1/год [13])

№ уч.	d , мм	l , км	$q_{\text{пут.}}$, л/с	$P_i = e^{-\lambda l t}$	$K_{\pi} = \mu / \mu + \lambda l_i$
1	2	3	4	5	10
1–2	250	1,05	22	0,979221	0,999880
1–7	250	0,94	20	0,981378	0,999893
6–7	200	1,02	22	0,979809	0,999883
2–6	200	0,94	21	0,981378	0,999893
5–6	200	0,2	5	0,996008	0,999977
4–5	200	0,9	20	0,982163	0,999897
3–4	250	0,71	15	0,985902	0,999919
2–3	250	0,84	18	0,983342	0,999904
5–10	200	0,66	15	0,986888	0,999925
10–11	150	0,34	9	0,993224	0,999961
11–12	150	0,83	18	0,983539	0,999905
4–12	200	1,05	22	0,979221	0,999880
7–8	200	1	22	0,980201	0,999886
8–9	200	0,48	14	0,990447	0,999945
9–10	150	1,15	26	0,977265	0,999869
9–14	125	0,69	15	0,986296	0,999921
13–14	125	1,13	26	0,977656	0,999871
11–13	150	0,36	10	0,992827	0,999959
Σ		14,29			

$$P_{\text{чугун}} = 0,667; P_{\text{пластик}} = 0,878.$$

Однако стоит уделить внимание тому, что трубопроводы в водопроводной сети имеют различные диаметры, а следовательно, в случае поломки количество воды, которое могут дополнительно транспортировать через себя смежные участки, также будет отличаться. Возможно, будет уместным учет влияния диаметров трубопроводов смежных участков, с точки зрения резервирования пропускной способности, на случай поломки одной из труб.

Вопросами неравнозначности элементов в различных отраслях науки занимались И. А. Рябинин (военная техника, электроника) [14], А. В. Горопашная (информационные технологии, электроника) [4], Ю. В. Доронина (экологический мониторинг) [5], А. А. Ионин (газоснабжение) [7], Н. И. Самойленко (водоснабжение) [13] и другие. Корни предложенной методики уходят в разработанный А. А. Иониным подход для расчета надежности с учетом значимости участков в зависимости от расхода в трубах.

Ввиду того, что в водоснабжении понижение подачи воды более чем на 30 % от расчетной считается отказом трубопровода, для улучшения ситуации с доставкой недостающей воды через смежные участки может вводиться резервирование пропускной способности трубопровода. Поэтому для расчета значимости участков в дальнейшем будет более перспективно опираться на площадь живого сечения труб, а не расчетный расход.

Учет значимости участков может быть полезным, так как ввиду разного диаметра труб, поступление количества жидкости из различных участков будет разным. Это особенно скажется в случае, если в системе не предусматривалось резервирование живого сечения труб, в таком случае поломка одного участка может иметь большие последствия, чем временное перекрытия подачи воды на других участках.

Т. о. при расчете будет целесообразным ввести, своего рода, коэффициент значимости в зависимости от диаметров участков.

Для этого находим величину относительного сечения труб на участке сети C_i :

$$C_i = \frac{f_i}{F} = \frac{d_i^2}{D^2} = \left(\frac{d_i}{D}\right)^2, \quad (4)$$

где d_i и f_i – диаметр (м) и площадь (м²) сечения труб, которые являются смежными с расчетным участком;

D и F – условный диаметр (м) и площадь сечения трубопровода (м²) для пропуска всего подаваемого в сеть расхода воды Q при скорости течения $V = 1$ м/с,

$$D = d_{c(1)} + d_{c(2)} + \dots + d_{c(n-1)} + d_{c(n)}.$$

Так как определяется влияние отключения других участков на снижение подачи воды в расчетном трубопроводе, естественно будет находить C_i только для смежных труб. Ввиду того, что отключение одного из смежных участков не обязательно приводит к уменьшению подачи воды ниже 70 % от расчетной, т. е. параметрическому отказу, следовательно, логично будет соединять данные участки параллельно. Аналогичным в структурно-логической схеме подсистемы будет соединение смежных труб с расчетным.

Таким образом, получаются отдельные подсистемы, позволяющие произвести расчет вероятности работы (P) отдельного участка с учетом влияния параметров смежных участков (снижение подачи воды на них, количество подключенных участков, площадь живого сечения труб). Пример расчета одной из подсистем приведена ниже. Так как за отказ системы можно считать невыполнение функции подачи воды в требуемом объеме одного из трубопроводов, следовательно, каждую из групп участков соединяем последовательно друг с другом в структурно-логической схеме и соответственно формуле (3) находим вероятность безотказной работы всей системы.

Расчет для участка 1–2 ($d = 0,25$ м), материал – полиэтилен (табл. 3, 4). Смежными ему являются участки 1–7 ($d = 0,25$ м), 2–3 ($d = 0,25$ м) и 2–6 ($d = 0,20$ м). Соответственно, сумма всех диаметров составит 0,70 м. Тогда коэффициенты значимости для смежных участков составят $C_{1-7} = 0,357$, $C_{2-3} = 0,357$, $C_{2-6} = 0,286$. Следом перемножаем P_i и C_i . Затем ведем расчет участков как параллельно соединенных элементов в структурно-логической схеме.

Таблица 3 – Пример расчета одной из подсистем

	№ уч-ка	Диаметр	C_i	$P_i = e^{-\lambda t}$	$C_i \cdot P_i$
Основной	1–2	0,25		0,979221	0,979221
Смежные	1–7	0,25	0,357	0,981378	0,350
	2–3	0,25	0,357	0,983342	0,351
	2–6	0,20	0,286	0,981378	0,281
		0,7	1,0	$P_{(подсист)} = 0,994$	

Таблица 4 – Расчетные показатели вероятности безотказной работы отдельных участков с учетом влияния пропускной способности смежных участков

Полиэтилен						Чугун					
№ уч.	P_i	№ уч.	P_i	№ уч.	P_i	№ уч.	P_i	№ уч.	P_i	№ уч.	P_i
1–2	0,994	3–4	0,996	7–8	0,994	1–2	0,890	3–4	0,996	7–8	0,994
1–7	0,994	2–3	0,995	8–9	0,997	1–7	0,994	2–3	0,995	8–9	0,997
6–7	0,992	5–10	0,995	9–10	0,990	6–7	0,992	5–10	0,995	9–10	0,990
2–6	0,992	10–11	0,997	9–14	0,996	2–6	0,992	10–11	0,997	9–14	0,996
5–6	0,998	11–12	0,995	13–14	0,978	5–6	0,998	11–12	0,995	13–14	0,978
4–5	0,993	4–12	0,994	11–13	0,998	4–5	0,993	4–12	0,994	11–13	0,998

После расчета всех подсистем получаем показатель параметрической вероятности безотказной работы с учетом влияния пропускной способности смежных участков. Для представленной в примере кольцевой системы подачи и распределения воды из материала полиэтилен, $P_{\text{парам.ПЭ}} = 0,894$, при той же системе и материале трубопроводов чугун – $P_{\text{парам.чугун}} = 0,800$. Этот показатель является одним из трех важных компонентов в решении задач надежности СПРВ с точки зрения особенностей сооружений: конструктивной, параметрической и эксплуатационной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев, М. И. О методологии исследования надёжности стареющих элементов систем водопровода и канализации [Текст] / М. И. Алексеев, Ю. А. Ермолин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2002. – Вып. № 9. – С. 2–4.
2. Аугусти, Г. Вероятностные методы в строительном проектировании [Текст] / Г. Аугусти, А. Баратта, Ф. Капшиати. – М. : Стройиздат, 1988. – 384 с.
3. Голинкевич, Т. А. Прикладная теория надежности [Текст] / Т. А. Голинкевич. – М. : Высшая школа, 1985. – 160 с.
4. Горопашная, А. В. Адаптация логико-вероятностных методов оценки веса, зависимости, вклада, ущерба и активности элементов для немонотонных логических функций [Текст] / А. В. Горопашная // International scientific school «Modelling and analysis of safety and risk in complex systems»: proceedings [of the Seventh Intern. sci. school MA SR-2007, Saint-Petersburg, Russia, Sept. 4–8, 2007] / [под ред. И. А. Рябиной, Е. Д. Соложенцева]. – Saint Petersburg : Inst. of problems of mechanical engineering of Russ. acad. of sciences (IPME RAS), 2007. – Р. 409–412.
5. Доронина, Ю. В. Метод модернизации информационных систем экологического мониторинга на основе анализа их функциональной нагрузки [Текст] / Ю. В. Доронина, В. О. Рябовая // Тр. СПИИРАН. – 2016. – Выпуск 44. – С. 133–152.
6. ДСТУ 2862-94. Методы расчета показаний надежности [Текст]. – Введ. 1994-12-08. – К. : Держстандарт України, 1994. – 39 с.
7. Ионин, А. А. Надежность систем тепловых сетей [Текст] / А. А. Ионин. – Москва : Стройиздат, 1989. – 265 с. – (НК: Надежность и качество).
8. Круценюк, И. Ю. Математические методы и модели оценки вероятности безотказной работы сети водоснабжения на примере г. Норильска [Текст] : дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук : спец. 05.13.18. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ [Текст] / И. Ю. Круценюк. – Норильск, 2005. – 193 с.
9. Левин, В. И. Логическая теория надежности сложных систем [Текст] / В. И. Левин. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 128 с. – (Надежность и качество).
10. Найманов, А. Я. Особенности оценки надежности кольцевой сети водопроводной сети [Текст] / А. Я. Найманов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2006. – № 12. – С. 11–16.
11. Правила предоставления коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов [Текст]. – Москва : Проспект, 2017. – 157 с. – ISBN 978-5-392-26896-2.
12. Про затвердження Правил надання послуг з централізованого опалення, постачання холодної та гарячої води і водовідведення та типового договору про надання послуг з централізованого опалення, постачання холодної та гарячої води і водовідведення [Електронний ресурс] : Постановою КМУ від 21 липня 2005 р. № 630 : із змінами / Законодавство України. – Електрон. дан. – Режим доступу : <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/630-2005-п>. – Загл. с экрана.
13. Ромейко, В. С. Защита трубопроводов от коррозии [Текст] / В. С. Ромейко, В. Г. Баталов, И. А. Ушакова. – М. : ВНИИМП, 2000. – 208 с.
14. Рябинин, И. А. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем [Текст] / И. А. Рябинин, Г. Н. Черкесов. – М. : Радио и связь, 1981. – 264 с. – (Б-ка инженера по надежности).

15. Самойленко, Н. И. Функциональная надежность магистральных трубопроводных транспортных систем [Текст] : Монография / Н. И. Самойленко, Т. С. Сенчук. – Х. : Издательство «ХТМТ», ХНАГХ, 2009. – 276 с.
16. СП 31.13330.2012. Свод правил. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84* [Текст]. – Введ. 2013-01-01. – М. : Минрегион России, 2012. – 124 с.
17. СП 32.13330.2012. Свод правил. Канализация Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85 [Текст]. – Введ. 2013-01-01. – М. : Минрегион России, 2012. – 87 с.

Получено 08.10.2017

Г. С. ТУРЧИНА
МАТЕМАТИЧНИЙ ПІДХІД ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ НАДІЙНОСТІ З
ВРАХУВАННЯМ ЗНАЧУЩОСТІ ТРУБОПРОВІДІВ У КІЛЬЦЕВИХ
СИСТЕМАХ ВОДОПОСТАЧАННЯ
ДОНБАСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

Анотація. Стаття присвячена проблемі врахування нерівнозначності різних ділянок трубопроводу у кільцевій системі подачі та розподілу води при розрахунку параметричної надійності. Запропонована методика знаходження показників надійності безвідмовної роботи з урахуванням впливу коефіцієнтів значущості ділянок трубопроводів.

Ключові слова: надійність, вірогідність безвідмовної роботи, кільцева водопровідна мережа, алгебра логіки, місткові системи.

GALINA TURCHINA
A MATHEMATICAL APPROACH TO SOLVING PROBLEMS OF RELIABILITY,
WITH REGARD TO THE SIGNIFICANCY OF PIPELINES IN THE RING
SYSTEMS OF WATER SUPPLY
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The article is devoted to the problem of account of unaccounted in equivalence of different sections of the pipelines in the ring system of the serve and distributing of water at the calculation of parametric reliability. The method of finding of indexes of faultless probability work is offered, with regard to account influencing of coefficient of significancy of sections of the pipelines.

Key words: reliability, probability of faultless work, ring systems of water supply, logical algebra, bridge connection.

Турчина Галина Сергеевна – магистр; преподаватель-стажер кафедры 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; викладач-стажист кафедри міського будівництва та господарства ДОНБАСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ. Наукові інтереси: надійність систем, методи підвищення надійності мереж водопостачання.

Turchina Galina – Master; graduate associate 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.

УДК 699.86

Р. А. ДАВЫДОВ, С. И. МОНАХ

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

**МЕТОД ОЦЕНКИ ТЕПЛОЗАЩИТЫ СТЕНЫ ЗДАНИЯ С ВЕНТИЛИРУЕМЫМ
ФАСАДОМ С УЧЕТОМ ПРОДОЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА**

Аннотация. Работа посвящена актуальной задаче расчета температурного поля в утеплителе вентилируемых фасадов. На основе анализа математической модели двумерного стационарного температурного поля предложен метод расчета, позволяющий проводить оценку теплозащитных свойств конструкций с учетом фильтрации наружного воздуха. По результатам проведенных расчетно-аналитических исследований рекомендовано при проектировании вентилируемых фасадов ввести ограничения по значению минимального расчетного сопротивления теплопередаче конструкции с учетом фильтрации воздуха в слое теплоизоляции межоконного простенка.

Ключевые слова: теплозащита, воздухопроницаемость, температурное поле, коэффициент воздухопроницаемости, энергосбережение, теплопроводность, теплоемкость, продольная фильтрация.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Учет продольной фильтрации воздуха принципиально не сводится к одномерной задаче и поэтому представляет вычислительные трудности. Сравнительно небольшая проработка данной темы, по-видимому, была вызвана незначительной актуальностью проблемы в недалеком прошлом и большими вычислительными затратами для ее разрешения. В последнее десятилетие произошли изменения, заставляющие вернуться к исследованию этой проблемы на новом уровне.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В статье проанализированы работы В. Г. Гагарина и В. В. Козлова по расчету теплозащиты фасадов с вентилируемым воздушным зазором. Предложены новые методики расчетов и определения теплопереноса в утеплителе.

ЦЕЛИ

Разработка методики расчета температурных полей в наружных стенах с вентилируемыми фасадами с учетом продольной фильтрации воздуха и методики расчета температурных режимов помещения с учетом процессов теплопереноса внутри ограждений.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Влияние фильтрации воздуха через ограждающие конструкции на их теплозащитные свойства исследовалось с конца XIX века. Первые исследования были проведены гигиенистами в лаборатории Эрисмана. Многосторонние исследования различных аспектов воздухопроницаемости и фильтрации были выполнены Р. Е. Брилингом [1]. В частности он экспериментально определил воздухопроницаемость большинства строительных материалов и конструкций стен, применяемых в то время. Математическая модель одномерного теплопереноса в конструкции при поперечной фильтрации воздуха была предложена Ф. В. Ушковым [2]. Им был разработан метод расчета распределения температуры по толщине конструкции при поперечной фильтрации воздуха. В дальнейшем были работы Ю. А. Калядина, В. С. Беляева, Е. В. Веселовацкой и др., посвященные исследованию конвективного движения воздуха и связанного с ним теплопереноса в конструкциях.

© Р. А. Давыдов, С. И. Монах, 2017

Во-первых, резкое повышение нормативных требований к сопротивлению теплопередаче стен в корне изменило их конструктивные решения. Практически невозможно спроектировать наружную ограждающую конструкцию без использования эффективных теплоизоляционных материалов.

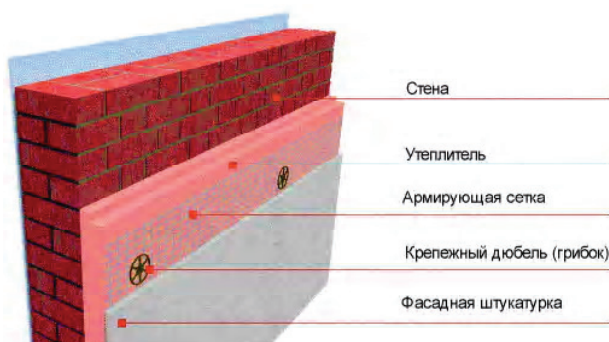


Рисунок – Схема навесного теплоизоляционного фасада.

Наиболее выгодное, с точки зрения теплофизики, расположение теплоизоляции в конструкции – у наружной поверхности (рис). Поэтому получили распространение навесные теплоизоляционные фасады – конструкции именно с таким расположением теплоизоляционного слоя.

Во-вторых, весьма распространенные материалы, применяемые в качестве наружной теплоизоляции, – волокнистые, а они обладают высокой воздухопроницаемостью.

Современные технологии позволяют получать и промышленно производить волокнистые минераловатные материалы и другие теплоизоляционные пористые материалы с

весьма малой плотностью, применение которых экономически выгодно. Чем меньше плотность теплоизоляционного материала, тем выше его воздухопроницаемость, хотя точной зависимости одного параметра от другого в настоящее время не установлено.

Несмотря на сложность точного расчета вентиляционного потока нагреваемого в строительной конструкции воздуха, это направление экономии топливно-энергетических ресурсов в современном строительстве является весьма перспективным. Поэтому необходим инженерный метод расчета температурного поля с учетом фильтрации воздуха в ограждающей конструкции.

Как уже отмечалось, перенос теплоты через конструкцию при учете продольной фильтрации воздуха принципиально не сводится к одномерной задаче, поэтому он может рассчитываться практически только численными методами. Характеристики теплозащиты конструкции в этом случае могут быть получены путем расчета температурного поля, причем решаемое уравнение должно учитывать перенос теплоты фильтрацией воздуха.

Уравнение теплопроводности, учитывающее перенос теплоты фильтрацией воздуха, в общем случае имеет вид [3]:

$$c_M \gamma_0 \frac{\partial t}{\partial z} = \operatorname{div}(\lambda \cdot \overrightarrow{\operatorname{grad} T} - c_B \cdot \overrightarrow{G_C} T), \quad (1)$$

где T – температура, К;

λ – расчетный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С);

c_B – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С) ($c_B = 1\,006$ Дж/(кг·°С));

c_M – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·°С);

G_C – плотность потока воздуха через конструкцию, кг/(м²·с);

γ_0 – плотность материала в сухом состоянии, кг/м³;

z – время, с.

Уравнение (1) является уравнением теплопроводности с добавкой, стоящей в скобках в правой части, представляющей собой плотность потока теплоты, переносимой перемещающимся воздухом. Выражение для этого потока легко может быть получено из общих соображений. Переносимая воздухом плотность потока теплоты равна теплоемкости воздуха, умноженной на его температуру и на плотность потока воздуха [4].

В рассматриваемой постановке задачи плотность потока воздуха через конструкцию принимается величиной, постоянной по координатам и по времени (стационарной). В этом случае через одну из границ участка конструкции поток воздуха входит в теплоизоляционный слой, а через другую – выходит. Воздух перемещается вдоль фасада, внутри воздушного зазора и в утеплителе под действием градиентов давления, которые возникают при воздействии ветрового напора. Количественное определение этих градиентов давления воздуха является задачей аэродинамики здания. По своей величине скорости движения воздуха, вызванные ветровым напором вдоль фасада здания, в воздушном зазоре и в утеплителе отличаются на порядки [5].

Так, если для движения воздуха вдоль фасада характерны скорости в несколько метров в секунду, то для соответствующего движения воздуха в воздушном зазоре – в несколько сантиметров в секунду, а для движения воздуха в утеплителе – в несколько сантиметров в минуту ($Re < 5$). Поэтому при рассмотрении проблем внешней аэродинамики здания чаще всего не учитывается движение воздуха в воздушном зазоре, а при рассмотрении проблем движения воздуха в воздушном зазоре не учитывается движение воздуха в утеплителе.

Но даже сравнительно небольшое движение воздуха в утеплителе способно переносить количество теплоты, сопоставимое с тепловыми потерями конструкции без фильтрации [6].

Следует отметить, что межоконные простенки подвержены наибольшему влиянию продольной фильтрации воздуха в утеплителе не потому, что при равных условиях воздух в утеплителе для этого узла движется интенсивнее (очевидно, что интенсивность движения воздуха зависит только от градиента давления и будет везде примерно одинакова), а потому, что чем короче путь воздуха в утеплителе, тем меньше он успевает прогреваться и интенсивнее отводит теплоту из конструкции [7].

Для определенности рассматривается фильтрация воздуха вдоль стены в направлении, перпендикулярном боковому оконному откосу (рис.).

Это наиболее простой и характерный случай, позволяющий проиллюстрировать особенности исследуемого процесса. Задача сводится к двумерной, а уравнение теплопроводности в стационарном процессе принимает вид [3]:

$$\lambda_x \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} - c_B \cdot G_c \cdot \frac{\partial t}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

где x, y – координаты, м;
 t – температура, °С;
 λ_x, λ_y – расчетные коэффициенты теплопроводности по соответствующим направлениям, Вт/(м·°С);
 G_c – поток воздуха через конструкцию, кг/(м²·с); $G_c > 0$, если воздух движется в положительном направлении оси y , $G_c < 0$ – если в отрицательном.

Введенная величина G_c отличается от общепринятой воздухопроницаемости G размерностью (представляет количество воздуха в секунду, а не в час). Эти величины связаны соотношением: $G = 3600 \cdot G_c$.

Поток воздуха через конструкцию G_c , входящий в уравнение (2), определяется формулой, полученной на основе опубликованных исследований [3]:

$$G_c = \frac{\Delta P}{3600 \cdot \left(2R_{u.ам} + \frac{L}{i} \right)} = \frac{\Delta P}{L} \cdot \frac{1}{3600 \cdot \left(\frac{2R_{u.ам}}{L} + \frac{1}{i} \right)}, \quad (3)$$

где L – длина участка конструкции, по которому движется воздух, м;
 ΔP – разность давлений на участке конструкции, вызывающая фильтрацию воздуха, Па;
 $\Delta P/L$ – градиент давления воздуха в теплоизоляционном слое конструкции, Па/м;
 i – коэффициент воздухопроницаемости теплоизоляционного материала, кг/(м·ч·Па);
 $R_{u.ам}$ – сопротивление воздухопроницанию ветрогидрозащитной мембраны, (м²·ч·Па)/кг;
 $1/3600$ – размерный коэффициент, связанный с переходом от часов в коэффициенте воздухопроницаемости к секундам в потоке воздуха.

Величины $\Delta P, i, L$ являются параметрами, необходимыми для расчета значения G_c . Градиент давления воздуха вдоль фасада здания, $\Delta P/L$, зависит как от геометрии здания, так и от параметров ветрового режима. Эта величина существенно изменяется во времени, а для проведения расчетов требуется только ее среднее значение.

Корректное определение этой величины для проведения инженерных расчетов требует специальных исследований в каждом конкретном случае.

Коэффициент воздухопроницаемости некоторых строительных и теплоизоляционных материалов приведен в нормативной литературе [4]. Коэффициент воздухопроницаемости большинства современных теплоизоляционных материалов и сопротивление воздухопроницанию ветрогидрозащитной мембраны определяются экспериментально. Для назначения их расчетных значений также требуются специальные исследования.

ВЫВОДЫ

В работе разработана актуальная научно-практическая задача формирования теплового, воздушного и влажностного режима помещений зданий с учетом требований экономии энергоресурсов. Проанализирован и обоснован метод расчета температурного поля с учетом фильтрации воздуха в ограждающей конструкции, а также метод определения воздухопроницаемости и сопротивления воздухопроницанию.

Разработанный метод расчета позволяет проводить оценку теплозащитных свойств конструкций с учетом фильтрации наружного воздуха. Вариант метода, изложенный в статье, предусматривает расчет наихудшей, с точки зрения теплопотерь, конструкции здания. Для систематического использования представленного метода расчета необходимо составить банк данных по коэффициентам воздухопроницаемости волокнистых теплоизоляционных материалов, используемых в вентилируемых фасадах, и разработать метод расчета перепадов давления на фасаде здания при ветре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика [Текст] / В. Н. Богословский. – М. : Высшая школа, 1982. – 415 с.
2. Фокин, К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий [Текст] / К. Ф. Фокин. – М. : Стройиздат, 1973. – 348 с.
3. Гагарин, В. Г. Расчет теплозащиты фасадов с вентилируемым воздушным зазором [Текст] / В. Г. Гагарин, В. В. Козлов, Е. Ю. Цыкановский // АВОК. – 2004. – № 2. – С. 20–26.
4. ДБН В 2.6-31:2006. Конструкції будівель і споруд. Теплова ізоляція будівель [Текст]. – На заміну СНиП II-3-79; чинні від 2007-04-01. – К. : Мінрегіонбуд України, 2006. – 72 с. – (Національний стандарт України).
5. Методические указания по проектированию новых типов наружных ограждающих конструкций с высокими теплозащитными показателями [Текст] / Г. К. Авдеев, Ю. А. Матросов, И. Н. Бутовский [и др.]. – М. : МНИИТЭП, 1995. – 284 с.
6. Артыкпаев, Е. Т. Экспериментальные исследования стыков наружных стен домов серии П44/17 с теплоизоляцией из фенольно-резольного пенопласта [Текст] / Е. Т. Артыкпаев, И. А. Румянцева, Е. Ф. Файфман // Тепловая эффективность наружных ограждающих конструкций : Сб. науч. ст. / Моск. н.-и. и проект. ин-т типового и эксперим. проектирования; Под ред. Г. К. Авдеева. – М. : Гл. архит.-планировоч. упр., 1988. – С. 47–53.
7. ВСН 43-96. Ведомственные строительные нормы по теплотехническим обследованиям наружных ограждающих конструкций с применением малогабаритных тепловизоров [Текст]. – Вводятся впервые ; введ. 1996-10-01. – М. : Мосоргстрой, 1996. – 20 с.

Получено 11.10.2017

Р. О. ДАВИДОВ, С. І. МОНАХ

МЕТОД ОЦІНКИ ТЕПЛОЗАХИСТУ СТІНИ БУДИНКУ З ВЕНТИЛЬОВАНИХ
ФАСАДІВ ІЗ УРАХУВАННЯМ ПОВЗДОВЖНІХ ФІЛЬТРАЦІЙ ПОВІТРЯ
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

Анотація. Робота присвячена актуальній задачі розрахунку температурного поля в утеплювачі вентильованих фасадів. На основі аналізу математичної моделі двовимірного стаціонарного температурного поля запропоновано метод розрахунку, що дозволяє проводити оцінку теплозахисних властивостей конструкцій з урахуванням фільтрації зовнішнього повітря. За результатами проведених розрахунково-аналітичних досліджень рекомендовано при проектуванні вентильованих фасадів ввести обмеження за значеннями мінімального розрахункового опору теплопередачі конструкції з урахуванням фільтрації повітря в шарі теплоізоляції міжвіконний простінок.

Ключові слова: теплозахист, повітропроникність, температурне поле, коефіцієнт повітропроникності, енергозбереження, теплопровідність, теплоємність, позовжня фільтрація.

ROMAN DAVYDOV, SVETLANA MONAKH
METHOD OF ESTIMATION OF THE THERMAL PROTECTION OF THE WALL
OF A BUILDING WITH VENTILATED FACADES, TAKING INTO ACCOUNT
LONGITUDINAL AIR FILTRATION

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The work is devoted to the actual task of calculating the temperature field in the heater of ventilated facades. On the basis of the analysis of the mathematical model of the two-dimensional stationary temperature field, a method of calculation is proposed, which allows evaluating the heat-protective properties of constructions, taking into account external air filtration. According to the results of calculations and analytical studies, it is recommended to introduce restrictions on the design value of the ventilated facades with respect to the value of the minimum design resistance of the heat transfer of the structure, taking into account the air filtration in the layer of thermal insulation of the inter-window sill.

Key words: thermal protection, air permeability, temperature field, coefficient of air permeability, energy saving, thermal conductivity, heat capacity, longitudinal filtration.

Давыдов Роман Александрович – бакалавр; магистрант кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: теплофизика, энергосбережение, развитие общей методики и анализа теплосбережения.

Монах Светлана Игоревна – кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергосбережение в коммунальной энергетике. Повышение эффективности теплотехнического оборудования.

Давидов Роман Олександрович – бакалавр; магістрант кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: теплофізика, енергозбереження, розробка загальної методики та аналізу теплозберігання.

Монах Світлана Ігорівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергозбереження в комунальній енергетиці. Підвищення ефективності теплотехнічного обладнання.

Davydov Roman – bachelor; master's degree student, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: thermophysics, energy conservation, development of general methodology and analysis of heat conservation.

Monakh Svetlana – 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 in municipal power engineering. Increasing the efficiency of heat engineering equipment.

УДК 697.273.86

А. О. ШАЦКОВ, В. Л. ВАКУЛОВИЧ, А. В. ЛЫХАЧ

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМ ЛУЧИСТОГО ОТОПЛЕНИЯ В ЖИЛЫХ ЗДАНИЯХ

Аннотация. В статье рассматривается возможность создания комфортных условий в жилом помещении при использовании низкотемпературных электрических инфракрасных отопительных панелей.

Ключевые слова: тепловой комфорт, микроклимат помещения, лучистое отопление, градиент температуры.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

В свете повышения требований к тепловому комфорту в жилых помещениях и росте цен на энергоносители остро стоит проблема эффективности использования топливно-энергетических ресурсов и теплоснабжения в целом. Использование децентрализованных систем отопления позволяет решить задачи энергоресурсосбережения. Одной из лучших альтернатив традиционному отоплению является использование низкотемпературных инфракрасных отопительных приборов, которые не имеют широкого распространения. Для определения эффективности такого способа отопления необходимо удостовериться, что использование лучистых панелей позволит создать комфортные условия в жилом помещении.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Анализ литературных источников показал [1–5], что наиболее изученными системами панельно-лучистого отопления жилых зданий являются низко- и среднетемпературные панели и отражательные экраны с централизованным теплоснабжением при помощи нагретых воды и воздуха, режы пара. Такие отопительные приборы размещаются в потолке, полу или у стен помещения (соответственно потолочная, напольная и стеновая системы) и представляют собой бетонные панели с замоноличенными греющими трубами, занимающими всю стену [1]. Они обладают большой инерционностью и высокой составляющей конвективного теплообмена, в результате чего от 40 до 70 % теплоты передается конвекцией [4]. Системы панельно-лучистого отопления начали широко применяться в СССР с 50-х годов прошлого века, что позволило тщательно изучить температурную обстановку при использовании таких систем, провести оценку теплоощущения в жилых помещениях и разработать диаграммы комфорта, на основании которых производится расчет системы отопления [1, 2, 4]. Набирающие популярность электрические инфракрасные панели недостаточно изучены, поэтому необходимо проверить возможность использования таких приборов в жилых помещениях в качестве основного источника теплоты.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ

Проверить выполнение второго условия комфортности при отоплении жилого помещения электрическими лучистыми отопительными приборами и их влияние на параметры микроклимата помещения.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

В последние годы наблюдается стабильный рост продаж электрических инфракрасных (в среднем на 20 % ежегодно) [6]. Их основное отличие от бетонных панелей состоит в том, что уменьшение размеров панелей позволило увеличить температуру излучающей поверхности [1] и уменьшить конвективную составляющую теплообмена. Главным условием возможности использования инфракрасных обогревателей для отопления жилых помещений является второе условие комфортности, ограничивающее интенсивность теплообмена при положении человека около нагретых и охлажденных поверхностей. Соотношение конвективной и лучистой составляющих теплоотдачи при различных способах отопления приведены на рисунке 1.

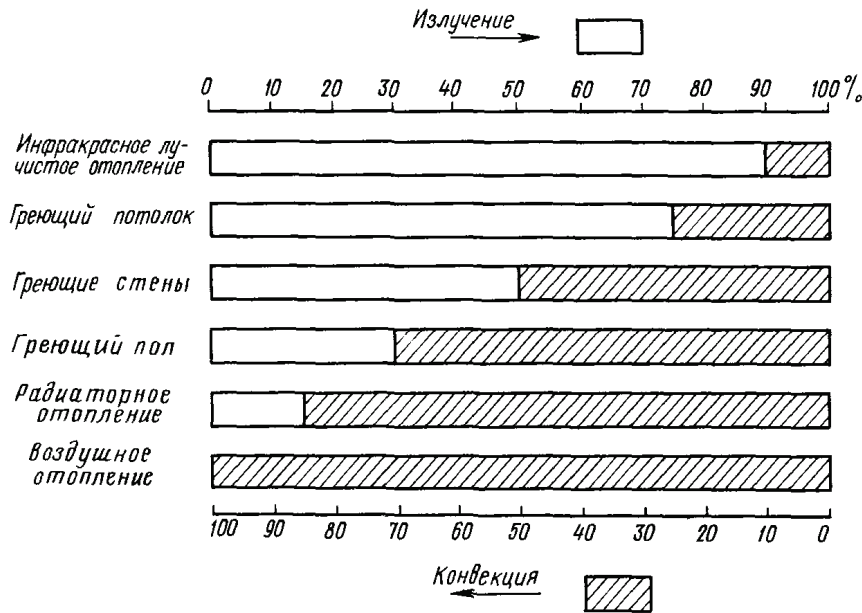


Рисунок 1 – Соотношение конвективной и лучистой теплоотдачи при различных способах отопления.

При расположении нагретой панели в потолке наиболее невыгодным (а потому расчетным) будет положение человека непосредственно под центром панели. При расположении панели в стенах за расчетное принимают положение человека на расстоянии 1 м от нагретой поверхности. При этом лучистая теплоотдача наиболее невыгодно расположенного участка головы должна быть не менее 11,6 Вт/м² и не более 35 Вт/м² [7].

Максимально допустимая температура нагретой поверхности в помещении определяется по формуле [4, 7]:

$$\tau_n^{\text{доп}} < 19,2 + \frac{8,7}{\varphi_{\text{ч-п}}}, \quad (1)$$

где $\varphi_{\text{ч-п}}$ – коэффициент облученности от элементарной площадки на поверхности человека, определяемый по методике, приведенной в [1].

На рисунке 2 изображена зависимость допустимой температуры излучающей поверхности.

Отсюда можно сделать вывод, что использование низкотемпературных лучистых отопительных панелей позволяет добиться выполнения второго условия комфортности в жилом помещении, т. к. температура поверхности большинства электрических отопительных приборов не превышает 100 °С [6].

Согласно стандарту ISO EN7730, разница температур между уровнем ног и головы человека в отапливаемом помещении должна быть менее 3 °С для категории II и менее 2 °С для категории I. Для систем с большей долей конвективной составляющей теплоотдачи (плинтусные панели под окнами, системы воздушного отопления, панели обогрева в торцевой стене) или системы водяного отопления с местными отопительными приборами разность температуры воздуха по высоте будет

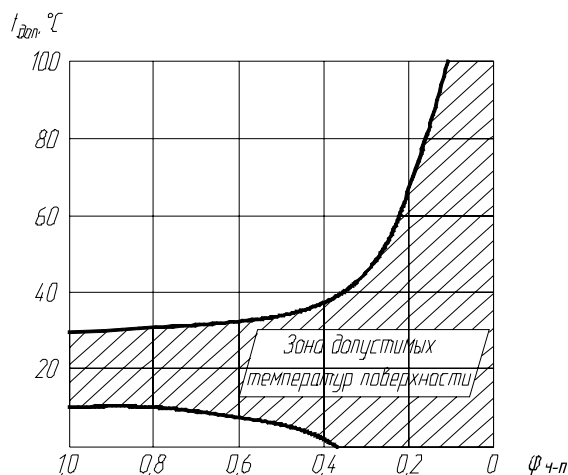


Рисунок 2 – Зона допустимых температур поверхности отопительного прибора из условий выполнения второго условия комфорта.

существенной [8]. Температурный градиент инфракрасной системы составляет $0,3\text{ }^\circ\text{C}$ на метр высоты и $2,5\text{ }^\circ\text{C}$ на метр высоты конвекционной системы [9], при этом создается температурная обстановка, более благоприятная для человека. Зависимость изменения температуры воздуха при различных видах отопления указаны на рисунках 3 и 4.

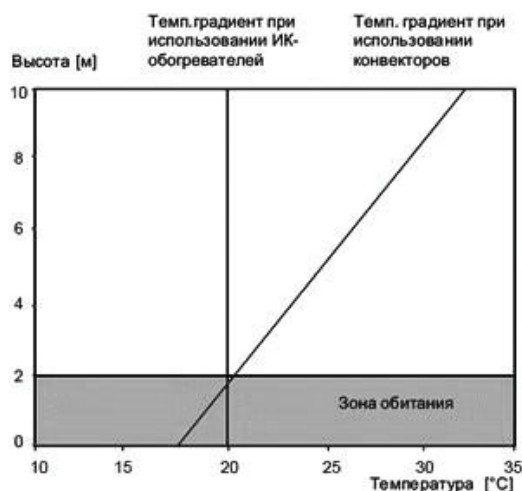


Рисунок 3 – Зависимость изменения температурного градиента от высоты помещения и внутренней температуры.

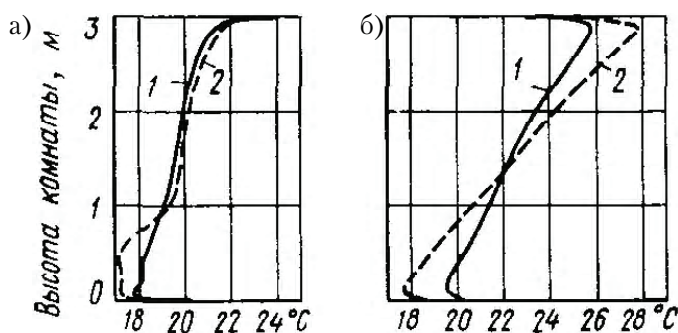


Рисунок 4 – Вертикальное распределение температуры воздуха при отоплении: а) лучистом; б) конвективном (радиаторном); 1 – в центре комнаты; 2 – вблизи окна.

При низкой подвижности воздуха вокруг тела человека образуется тонкая воздушная оболочка, имеющая высокую температуру и насыщенную водяным паром. В результате затрудняется тепло- и влагообмен с окружающим воздухом. Минимальная подвижность воздуха, разрушающая эту оболочку, по данным разных авторов, составляет $0,05\text{--}0,10\text{ м/с}$. Чрезмерная подвижность воздуха вызывает ощущение сквозняка. Из-за охлаждающего воздействия движущегося воздуха нарушается тепловосприятие кожного покрова, при этом, как только эффект охлаждения превысит некоторое критическое значение, сосуды начинают сужаться. Наиболее подвержены воздействию сквозняка затылок и лодыжки, при этом подвижность воздуха ограничена $0,15\text{ м/с}$. Область комфортного сочетания подвижности и температуры указана на рисунке 5 [10].

Использование инфракрасных отопительных приборов, которые имеют значительно меньшую конвективную составляющую [4] теплообмена и малую площадь излучающей поверхности в

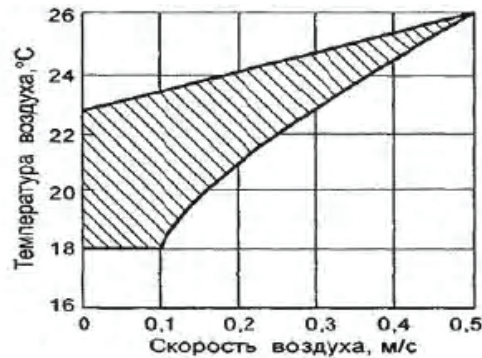


Рисунок 5 – Область комфортного сочетания подвижности и температуры воздуха.

сравнении с бетонными панелями, позволяет снижать подвижность воздуха в помещении, а также избежать таких негативных последствий применения конвективных отопительных приборов, как сквозняки, пересушивания воздуха и перенос пыли [6, 9].

ВЫВОД

Проведенные аналитические исследования позволяют сделать вывод, что использование низкотемпературных электрических систем лучистого отопления позволяет добиться оптимальных параметров микроклимата при выполнении второго условия комфортности, ограничивающего применение инфракрасных приборов в жилых помещениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сканави, А. Н. Отопление [Текст] / А. Н. Сканави, Л. М. Махов. – М. : АСВ, 2002. – 522 с.
2. Богословский, В. Н. Отопление [Текст] / В. Н. Богословский, А. Н. Сканави. – М. : Стройиздат, 1991. – 735 с.
3. Миссенар, А. Лучистое отопление и охлаждение [Текст] : пер. с франц. / А. Миссенар. – М. : Госстройиздат, 1961. – 299 с.
4. Мачкаши, А. Лучистое отопление [Текст] / А. Мачкаши, Л. Банхиди ; пер. с венгерского В. М. Беляева, под ред. В. Н. Богословского и Л. М. Махова. – М. : Стройиздат, 1985. – 464 с.
5. Панельно-лучистые системы отопления и охлаждения зданий [Электронный ресурс] / АВОК: вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2015. – № 5. – С. 40–43.
6. Электрические инфракрасные обогреватели [Электронный ресурс] // С.О.К. Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2007. – № 5. – Режим доступа : <https://www.c-o-k.ru/articles/elektricheskie-infrakrasnye-obogrevateli>.
7. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика [Текст] / В. Н. Богословский. – М. : Высшая школа, 1982. – 415 с.
8. Olesen, B. W. Критерии теплового комфорта при проектировании систем отопления [Электронный ресурс] / B. W. Olesen // АВОК: вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2009. – № 5. – Режим доступа : https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=4355.
9. Шумилов, Р. Н. Лучистое отопление – мифы и реальность [Текст] / Р. Н. Шумилов, Ю. И. Толстова, А. А. Поммер // С.О.К. Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2006. – № 1. – С. 56–58.
10. Кувшинов, Ю. Я. Теоретические основы обеспечения микроклимата помещения. Учебное пособие для студентов специальности 270109 [Текст] / Ю. Я. Кувшинов. – М. : АСВ, 2007. – 184 с.

Получено 11.10.2017

А. О. ШАЦКОВ, В. Л. ВАКУЛОВИЧ, А. В. ЛИХАЧ
ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ
СИСТЕМ ПРОМЕНЕВОГО ОПАЛЕННЯ В ЖИТЛОВИХ БУДИНКАХ
ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

Анотація. У статті розглядається можливість створення комфортних умов в житловому приміщенні при використанні низькотемпературних електричних інфрачервоних опалювальних панелей.

Ключові слова: тепловий комфорт, мікроклімат приміщень, променисте опалення, градієнт температури.

ARTEM SHATSKOV, VALERIA VAKULOVICH, ALINA LYKHACH
THEORETICAL ASPECTS OF THE USE OF LOW-TEMPERATURE RADIANT
HEATING SYSTEMS IN RESIDENTIAL BUILDINGS

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The article has considered the possibility of creating comfortable conditions in a residential building by using low-temperature electric infrared heating panels.

Key words: thermal comfort, indoor climate, radiant heating, temperature gradient.

Шацков Артем Олегович – аспирант кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергоресурсосбережение в системах теплоснабжения с помощью внедрения систем электрического лучистого отопления.

Вакулович Валерия Леонидовна – магистрант кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергоресурсосбережение в системах теплоснабжения с помощью внедрения систем электрического лучистого отопления.

Лыхач Алина Владимировна – магистрант кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергоресурсосбережение в системах теплоснабжения с помощью внедрения систем электрического лучистого отопления.

Шацков Артем Олегович – аспірант кафедри теплотехніки, теплогазопостачання і вентиляції ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергоресурсозбереження в системах теплопостачання з допомогою впровадження систем електричного променистого опалення.

Вакулович Валерія Леонідівна – магістрант теплотехніки, теплогазопостачання і вентиляції ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергоресурсозбереження в системах теплопостачання з допомогою впровадження систем електричного променистого опалення.

Лихач Аліна Володимирівна – магістрант кафедри теплотехніки, теплогазопостачання і вентиляції ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергоресурсозбереження в системах теплопостачання з допомогою впровадження систем електричного променистого опалення.

Shatskov Artem – a postgraduate student, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: energy and resource saving in heat supply systems through the introduction of systems electric radiant heating.

Vakulovich Valeria – master's student, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: energy and resource saving in heat supply systems through the introduction of systems electric radiant heating.

Lykhach Alina – master's student, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: energy and resource saving in heat supply systems through the introduction of systems electric radiant heating.

УДК 697.32

Я. А. ГУСЕНЦОВА^а, А. А. КОВАЛЕНКО^а, М. В. ПИЛАВОВ^а, К. К. КОПЕЦ^б

^а ГОУ ВПО «Луганский национальный университет им. В. Даля», ^б ГОУ ЛНР «Луганский национальный аграрный университет»

ВЫБОР РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩЕГО ОБЪЕКТА

Аннотация. Приведен анализ работы теплогенерирующих объектов с различными типами регуляторов при разных значениях параметров объекта регулирования. Проведен сравнительный анализ эффективности использования регуляторов в системах регулирования.

Ключевые слова: теплогенератор, регулирование, эффективность, переходный процесс.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Системы теплоснабжения являются частью топливно-энергетического комплекса и потребляют до 20 % энергоресурсов республики. Поэтому рациональное использование первичных энергетических ресурсов, а именно внедрение новых технологических процессов, реконструкция, модернизация, оптимизация режимов эксплуатации теплогенерирующих объектов, которые приводят к экономии энергоресурсов, имеют важное значение для экономики [1, 6].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Широкий круг исследований, проведенный различными авторами [3, 5] показал, что эксплуатация теплогенерирующих объектов неэффективна без широкой и полной автоматизации систем управления. В настоящее время промышленностью выпускается достаточно широкий класс приборов и оборудования, позволяющих автоматизировать практически любую систему регулирования теплогенерирующих объектов [4, 5]. Остается открытым вопрос выбора закона регулирования для конкретной системы, обеспечивающего наиболее экономичный режим как в условиях статики, так и в переходных режимах.

ЦЕЛЬ

Исследование режимов регулирования теплогенерирующих объектов с различными типами регуляторов для повышения их эффективности.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Экспериментальные и теоретические исследования динамических характеристик промышленных теплогенераторов [2] показали, что их динамика описывается передаточной функцией вида

$$W(p) = \frac{k_0 \exp(-\tau p)}{\prod_{i=1}^n (T_i p + 1)}, \quad (1)$$

где k_0 – коэффициент передачи (отношение выходного сигнала к входному);
 τ – время транспортного запаздывания;
 T – постоянная времени, зависящая от инерционности объекта.

Закон регулирования для подобного типа систем является важным средством повышения технологической эффективности. Известно, что с повышением степени автоматизации уровень технологической эффективности увеличивается. Однако в исследуемых объектах существует рентабельный уровень автоматизации (насыщения системами автоматического регулирования). При значительной тепловой мощности становится рентабельнее применение все большего числа систем автоматического регулирования. При этом должна быть решена задача о выборе типа регулятора для регулирования технологического процесса.

Выбор закона регулирования для конкретного объекта зависит от предъявляемых к нему требований: минимальная ошибка регулирования, постоянство параметра регулирования и т. д.

При попытке практического использования формулы (2) для технической реализации оптимального регулятора сразу же возникает трудность в моделировании оператора объекта W_μ^0 . Этот оператор выражается обычно весьма сложными (как правило, трансцендентными) математическими зависимостями, а в случае, когда характеристики объекта получены экспериментально, они вообще задаются таблично или в виде графиков. В этой связи возникает проблема аппроксимации реальной характеристики объекта.

$$W_{p, \text{опт.}}(p) \approx \frac{1}{\tau_\mu p W_\mu^0(p)}. \quad (2)$$

В основу критерия приближения при аппроксимации динамических характеристик объекта должна быть положена конечная цель аппроксимации, а именно получение системы регулирования, в минимальной степени отличающейся от оптимальной системы. При этом критерий приближения должен быть подчинен показателю точности оптимальной системы. В частности, для показателя оптимальности системы регулирования – минимума среднеквадратичной ошибки регулирования задача оптимального приближения при аппроксимации динамической характеристики объекта должна формулироваться следующим образом.

По заданной динамической характеристике объекта W_μ^0 выбрать структуру и параметры аппроксимирующей характеристики $W_{\mu a}^0$ так, чтобы среднеквадратичная ошибка системы регулирования с регулятором, частотная характеристика которого определяется полученной формулой при замене в ней W_μ^0 на $W_{\mu a}^0$ отличалась от среднеквадратичной ошибки оптимальной системы на минимально возможную величину. В этом отражается необходимость использования системного подхода при построении математической модели объекта.

$$W_p(p) \approx \frac{1}{\tau_{\mu a} p W_{\mu a}^0(p)}, \quad (3)$$

Соответственно решение задачи синтеза реального регулятора, в наименьшей степени отличающегося от регулятора, обеспечивающего предельную динамическую точность регулирования, может осуществляться в такой последовательности.

Исходя из общего вида характеристики W_μ^0 , подбирается достаточно простая структура аппроксимирующей динамической характеристики $W_{\mu a}^0$ и определяется соответствующая ей структура оператора регулятора $W_p(p)$.

По характеристике объекта W_μ^0 и спектру мощности $G_{xx}(p)$ входного воздействия $x(t) = s(t) - u(t)$ отыскиваются численные значения оптимальных коэффициентов оператора регулятора (эти коэффициенты обычно называются параметрами настройки регулятора, минимизирующих дисперсию ошибки для каждой комбинации параметров настройки), по формуле:

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |\Phi_{ss}(j\omega)|^2 G_{xx}(\omega) d\omega, \quad (4)$$

где Φ_{ss} – частотная характеристика системы регулирования, определяемая по формуле

$$\Phi_{ss} = \frac{1}{1 + W(p)}. \quad (5)$$

При выборе структуры аппроксимирующей характеристики $W_{\mu a}^0$ необходимо, чтобы характеристическое уравнение регулятора не имело корней в правой полуплоскости. В противном случае полученная система может оказаться не грубой к вариациям параметров.

Проведенные аналитические и экспериментальные исследования показали, что переходные характеристики в теплогенерирующих установках имеют апериодический характер. Такие характеристики были аппроксимированы инерционной системой n -го порядка с запаздыванием, а в случаях, когда может быть допущена большая динамическая ошибка регулирования, – инерционной системой первого порядка с запаздыванием или даже просто безинерционной системой с запаздыванием.

$$W(p) = \frac{k_0 \exp(-\tau p)}{\prod_{i=1}^n (T_i p + 1)}. \quad (6)$$

Подстановка указанных аппроксимирующих характеристик в общее выражение приводит к следующим трем типам регулятора, которые в настоящее время обычно реализуются в серийной аппаратуре регулирования и считаются типовыми.

Численный эксперимент с аналоговыми регуляторами (пропорциональным П-регулятором, интегральным И-регулятором, пропорционально-дифференциальным ПД-регулятором, пропорционально-интегральным ПИ-регулятором и пропорционально-интегрально-дифференциальным регулятором) показал, что в наибольшей степени указанному критерию удовлетворяет ПИД-регулятор, передаточная функция которого определяется выражением

$$W_p(p) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_u p} + T_d p \right), \quad (7)$$

где k_p – коэффициент передачи регулятора;
 T_u, T_d – постоянные интегрирования и дифференцирования регулятора, являющиеся параметрами его настройки.

Регулятор с таким алгоритмом работы осуществляет перемещение регулирующего органа в каждый момент времени пропорционально отклонению регулируемой величины, интегралу и производной отклонения:

$$\mu(t) = k_p \left[\varepsilon(t) + \frac{1}{T_u} \int \varepsilon(t) dt + T_d \varepsilon'(t) \right]. \quad (8)$$

Особенностью характеристики теплогенераторов является то, что регулируемая переменная (температура теплоносителя) с течением времени стабилизируются на некотором новом значении. Объекты с такими переходными характеристиками получили название объектов с саморегулированием.

Переходные и частотные характеристики наиболее распространенных законов регулирования и соответствующие каждому закону переходные характеристики аппроксимирующей модели объекта приведены в [2, 3].

Анализ динамических характеристик теплогенераторов показал, что с достаточной степенью точности она может быть представлена в виде последовательного соединения двух инерционных звеньев с постоянными времени T_1 и T_2 и звена транспортного запаздывания с временем запаздывания (рис. 1). Здесь x – регулирующее воздействие, tg – параметр возмущения.

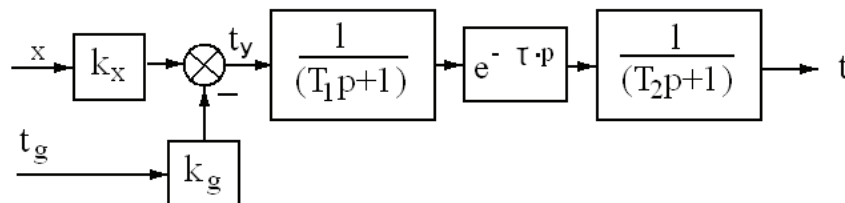


Рисунок 1 – Структурная схема объекта управления.

На такой структурной схеме проводился численный эксперимент.

Исследовались следующие параметры, характеризующие качество регулирования переходных процессов (рис. 2):

- длительность переходного процесса – $T_{пер}$;

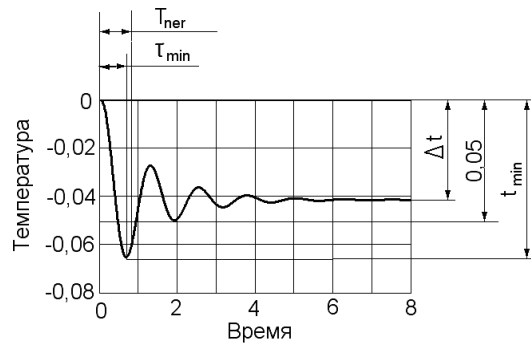


Рисунок 2 – Схема определения показателей качества переходного процесса.

- максимальное или минимальное значение регулируемого параметра в течение переходного процесса (в данном случае – минимальная безразмерная температура – t_{min});
- время достижения минимума или максимума τ_{min} ;
- амплитуда автоколебаний;
- период автоколебаний;
- среднее значение температуры при автоколебаниях;
- установившееся по окончании переходного процесса значение температуры (статическая ошибка регулирования) – Δt .

Вначале для каждого типа регулятора установлен допустимый диапазон изменения его параметров настройки, например для пропорционально-интегро-дифференциального регулятора, это – коэффициент усиления пропорциональной части и постоянные времени интегрирования и дифференцирования. Допустимый диапазон параметров ограничивается, с одной стороны – колебательной границей области устойчивости, с другой – требованиями к точности в установившемся режиме (с учетом физических ограничений). В работе точность ограничивается 5%-ой зоной от величины заданного значения температуры, в безразмерных величинах – $\pm 0,05$ (рис. 3).

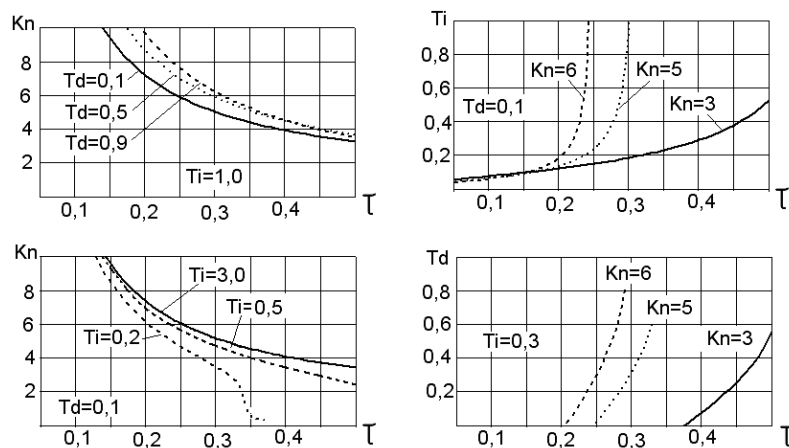


Рисунок 3 – Области устойчивости системы с ПИД-регулятором.

Проведенные исследования работы теплогенерирующих объектов с различными типами регуляторов и при различных значениях параметров объекта регулирования позволили сделать следующий вывод:

Пропорционально-интегро-дифференциальные регуляторы являются наиболее эффективными из аналоговых линейных регуляторов, позволяя в достаточно широком диапазоне времен запаздывания объекта получать качественные переходные процессы с хорошим быстродействием и с нулевой статической ошибкой. Однако при таком выборе следует учитывать сложность ПИД-регулятора и его стоимость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления Текст / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.
2. Экспериментальное определение динамических характеристик теплогенерирующих объектов [Текст] / Я. А. Гусенцова, А. А. Коваленко, М. В. Пилавов, С. А. Письменная // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Сб. науч. трудов. – Луганск: Изд. ЛГУ им. В. Даля, 2016. – № 2(17). – С. 166–170.
3. Характеристика тепломассопереноса в котельных установках Текст: монография / А. А. Коваленко, М. В. Пилавов, Н. Д. Андрийчук, Я. А. Гусенцова. – Луганск: Издательство Луганского национального университета им. В. Даля, 2016. – 316 с.
4. Bujak, J. Mathematical modelling of a steam boiler room to research thermal efficiency [Текст] / J. Bujak // Energy. – 2008. – 33. – P. 1779–1787.
5. Lee, Seungro. Performances of a heat exchanger and pilot boiler for the development of a condensing gas boiler [Текст] / Seungro Lee, Sung-Min Kum, Chang-Eon Lee // Energy. – 2011. – Volume 36, Issue 7. – P. 3945–3951.
6. Comparison of different testing methods for gas fired domestic boiler efficiency determination [Текст] / M. D. Paere, C. T. Joen, H. Huisseune [et al.] // Appl. Therm. Eng. – 2013. – 50. – P. 275–281.

Получено 12.10.2017

Я. А. ГУСЕНЦОВА ^a, А. О. КОВАЛЕНКО ^a, М. В. ПИЛАВОВ ^a, К. К. КОПЕЦЬ ^b
ВИБІР РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ТЕПЛОГЕНЕРУЮЧОГО ОБ'ЄКТА

^a ДОО ВПО «Луганський національний університет ім. В. Даля», ^b ДОО ЛНР «Луганський національний аграрний університет»

Анотація. Наведено аналіз роботи теплогенеруючих об'єктів із різними типами регуляторів при різних значеннях параметрів об'єкта регулювання. Проведено порівняльний аналіз ефективності використання регуляторів в системах регулювання.

Ключові слова: теплогенератор, регулювання, ефективність, перехідний процес.

YANA GUSENTZOVA ^a, ALIM KOVALENKO ^a, MANOLIS PILAVOV ^a,
KARINA KOPETS ^b

THE CHOICE OF CONTROLLER FOR THE HEAT GENERATING OBJECT

^a Vladimir Dahl Lugansk National University, ^b Lugansk National Agrarian University

Abstract. The analysis of work of heat-generating objects with different types of controllers with different values of parameters of object of regulation was presented. A comparative analysis of the efficiency of regulators in the systems of heat generators has been carried out.

Key words: heat generating object, regulation, efficiency, transient.

Гусенцова Яна Алимовна – доктор технических наук, профессор кафедры вентиляции, теплого- и водоснабжения ГОУ ВПО «Луганский национальный университет им. В. Даля». Научные интересы: математическое моделирование гидромеханических процессов в гидроприводах различного назначения, моделирование и расчет вентиляционных систем промышленных предприятий и зданий, вопросы регулирования процессов тепломассообмена

Коваленко Алим Алексеевич – кандидат технических наук, профессор кафедры гидрогазодинамики ГОУ ВПО «Луганский национальный университет им. В. Даля». Научные интересы: нестационарные процессы тепломассопереноса, диффузионные процессы, динамика технических систем, реология жидкости.

Пилавов Манолис Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры вентиляции, теплого- и водоснабжения ГОУ ВПО «Луганский национальный университет им. В. Даля». Научные интересы: нестационарные процессы тепломассопереноса.

Копец Карина Константиновна – аспирантка кафедры технологии и организации строительного производства ГОУ ЛНР «Луганский национальный аграрный университет». Научные интересы: моделирование и расчет вентиляционных систем промышленных предприятий и зданий, вопросы регулирования процессов тепломассообмена.

Гусенцова Яна Алімівна – доктор технічних наук, професор кафедри вентиляції, теплогазо- та водопостачання ДОУ ВПО «Луганський національний університет ім. В. Даля». Наукові інтереси: математичне моделювання гідромеханічних процесів у гідроприводах різного призначення, моделювання та розрахунок вентиляційних систем промислових підприємств та будівель, питання регулювання процесів тепло масообміну.

Коваленко Алім Олексійович – кандидат технічних наук, професор кафедри гідрогазодинаміки ДОУ ВПО «Луганський національний університет ім. В. Даля». Наукові інтереси: нестационарні процеси тепломасопереносу, дифузійні процеси, динаміка технічних систем, реологія рідини

Пілавов Маноліс Васильович – кандидат технічних наук, доцент кафедри вентиляції, теплогазо- та водопостачання ДОУ ВПО «Луганський національний університет ім. В. Даля». Наукові інтереси: нестационарні процеси тепломасопереносу.

Копець Каріна Костянтинівна – аспірант кафедри технології і організації будівельного виробництва ДОУ ЛНР «Луганський національний аграрний університет». Наукові інтереси: моделювання і розрахунок вентиляційних систем промислових підприємств і будівель, питання регулювання процесів тепло масообміну.

Gusentsova Yana – D.Sc. (Eng.), Professor the department of Ventilation, Heat and Gas and Water Supply, Vladimir Dahl Lugansk National University. Scientific interests: mathematical simulation of hydrodynamic processes in hydraulic drives for various purposes, modeling and calculation of ventilation systems for industrial plants and buildings, the regulation of processes of heat and mass exchange.

Kovalenko Alim – Ph. D. (Eng.), Professor, Hydro-gas Dynamics Department, Vladimir Dahl Lugansk National University. Scientific interests: non-stationary processes of heat and mass transfer, diffusion processes, dynamics of technical systems, fluid theology.

Pilavov Manolis – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Ventilation, Heat and Gas and Water Supply Department, Vladimir Dahl Lugansk National University. Scientific interests: non-stationary processes of heat and mass transfer.

Kopets Karina – post-graduate student, Technology and Organization of Building Production Department, Vladimir Dahl Lugansk National Agrarian University. Scientific interests: modeling and calculation of ventilation systems of industrial enterprises and buildings, regulation of heat and mass exchange.

УДК 621.165

А. А. ОЛЕКСЮК, А. А. РУСАКОВА, Е. А. РУСАКОВА

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ ЗДАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ОТ АТЭЦ

Аннотация. Рассмотрена возможность использования теплоносителя от АТЭЦ для теплоснабжения зданий при помощи теплофикации. Представлена схема четырехконтурного ТО для независимой схемы присоединения систем ОВ и ГВ при использовании теплоносителя от АТЭЦ. Рассмотрено применение ядерного топлива для теплоснабжения.

Ключевые слова: теплоэлектроцентраль (ТЭЦ), атомная теплоэлектроцентраль (АТЭЦ), теплоснабжение.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Органическое и ядерное топливо являются исчерпаемыми природными ресурсами, поэтому всегда актуальными будут проблемы повышения эффективности их использования на основе как совершенствования энергетического оборудования, так и создания новых высокоэффективных технологий производства тепловой и электрической энергии, что позволит решить вопросы экономии энергоресурсов.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ

Рассмотреть четырехконтурный теплообменник с использованием теплоносителя от АТЭЦ для теплоснабжения зданий и экономии органического топлива.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Историю освоения атомной энергии часто исчисляют с открытия в 1896 г. Анри Беккерелем явления радиоактивности. Спустя несколько лет после открытия Беккереля ученые начали рассматривать атом как потенциальный, почти неисчерпаемый источник энергии, хотя не знали о его природе. В то время Резерфорд говорил, что если когда-нибудь удастся осуществить контроль над скоростью распада радиоактивных элементов, то это позволит получать колоссальный источник энергии в форме небольшого сгустка материи. Сам Резерфорд из-за неудач разочаровался в излучении ядерной энергии.

Только физики Отто Ган и Фриц Штрассман обнаружили, что при бомбардировке тяжелых ядер урана нейтронами получается барий, вплотную подошли к обчислению процесса расщепления атомного ядра, сопровождающегося выделением энергии. Далее ученые одновременно во многих странах установили деление ядер урана, т. е. возможности цепной реакции.

Впервые ядерная энергия была превращена в тепло 2 декабря 1942 г. в Чикаго (США) в лабораторной установке, сооруженной под руководством итальянского физика Энрико Ферми. Первое испытание атомной бомбы состоялось в США в штате Нью – Мексико 16 июля 1945 г., которое известило мир о том, что атом вошел в жизнь человека с уничтожающей силой. В последующие годы проводились исследования по выявлению возможностей использования атомной энергии в мирных целях.

Первая в мире атомная электростанция (АЭС) была введена в эксплуатацию в Обнинске 24 июня 1954 г. На АЭС энергия, получаемая в результате деления ядер урана на осколки, превращается в

© А. А. Олексюк, А. А. Русакова, Е. А. Русакова, 2017

тепловую энергию пара или газа и затем в электрическую энергию. Получаемая при делении ядер энергия почти полностью превращается в тепло. Установка, в которой происходит управляемая цепная реакция деления, называется ядерным реактором.

Обычные тепловые электростанции (ТЭС) отличаются от АЭС только тем, что рабочее тело (пар или газ) получает тепло в парогенераторах при сжигании органического топлива, на АЭС – в ядерных реакторах.

Основной элемент АЭС – ядерный реактор – состоит из активной зоны, отражателя, системы охлаждения, системы управления, регулирования, контроля и биологической защиты. В рабочие каналы активной зоны помещают ядерное топливо в виде стержней из урана или плутония, покрытых герметичной металлической оболочкой. В этих стержнях и происходит ядерная реакция, сопровождаемая большим количеством тепла. Поэтому стержни с ядерным топливом называют тепловыделяющими элементами – ТВЭлами. Количество ТВЭлов в активной зоне может достигать до нескольких тысяч. В активную зону также помещают замедлитель нейтронов, через нее проходит также теплоноситель. В качестве теплоносителя используется обычная вода, тяжелая вода, водяной пар, жидкие металлы, некоторые инертные газы (гелий, углекислый газ). Теплоноситель с помощью принудительной циркуляции омывает в рабочих каналах поверхности ТВЭлов, нагревается и уносит с собой тепло для дальнейшего использования.

Мощность энергетического реактора определяется возможностью быстрого отвода тепла из активной зоны. Поскольку отвод тепла происходит за счет конвективного теплообмена, то для повышения интенсивности процесса отвода тепла нужно увеличить скорость теплоносителя. Скорость движения воды в активной зоне 3...7 м/с, а скорость газов 30...80 м/с.

Управление реактором производится с помощью специальных стержней, поглощающих нейтроны, что позволяет управлять ядерной реакцией. Тепло, выделяющееся в реакторе, может передаваться рабочему телу теплового двигателя (турбины) по одно-, двух- и трехконтурным схемам. Каждый контур представляет собой замкнутую систему. Многоконтурная система обеспечивает радиационную безопасность и удобства для обслуживания оборудования. Число контуров зависит от типа реактора и свойств теплоносителя, характеризующих его пригодность для использования в турбине. При двухконтурной схеме теплоноситель передает тепло рабочему телу в парогенераторе. Если в качестве теплоносителя используется вода, то в парогенераторе она охлаждается на 15...40 °С. Первый контур радиоактивен, поэтому целиком находится внутри биологической защиты. Во втором контуре рабочее тело пар или вода нигде не соприкасаются с радиоактивным теплоносителем первого контура, поэтому с ним можно обращаться также как на ТЭС.

Масштабы потребления первичных энергоресурсов

В 70-х годах XX столетия перед человечеством стоял вопрос об истощении невозобновляемых тепловых ресурсов, загрязнении окружающей среды и значительном увеличении затрат на развитие энергетики. Единственным выходом из этого положения являлось освоение запасов неорганического ядерного топлива.

К концу 1980 г. установленная мощность АЭС составила 20 млн кВт. На первом этапе намечено строительство АЭС на тепловых замедленных нейтронах с водоводяным электрическим реактором ВВЭР – 1 000 МВт, РБИК – 1 500 МВт. Эти АЭС расходуют U-235, которого в природном уране содержится 0,7 % и запасы его ограничены. На втором этапе – строительство АЭС на быстрых нейтронах, которые используют U-238, которого в природе в 130 раз больше чем U-235. Реакторы на быстрых нейтронах обладают свойством воспроизводства плутония из урана. Использование ядерного топлива только для электрической энергии даже на уровне 2000 года позволит заменить 10 % органического топлива, преобладающая часть которого используется на производство тепла низкого и среднего потенциала. Следовательно, для увеличения ядерного топлива в топливно-энергетическом балансе возникает необходимость использования ядерного горючего на ТЭЦ и котельных, так как они потребляют 40 % всего добываемого топлива, 80 % которого составляет нефть и газ.

Применение ядерного топлива для теплоснабжения осуществляется следующими путями:

1. Строительство атомной теплоэлектростанции (АТЭЦ).
2. Строительство атомных систем теплоснабжения (АСТ).
3. Строительство атомных котельных для покрытия тепловых нагрузок жилищно-промышленных комплексов в горячей воде и технологическом паре АСПТ.
4. Установкой на АЭС теплофикационных турбин.
5. Использование нерегулируемых отборов с КАЭС.

Было установлено, что на АТЭЦ надо применять реакторы предельной мощности. Для АТЭЦ целесообразно создание нового типа теплофикационно-компрессорной турбины ТК с большой связанной теплофикационной мощностью. На АТЭЦ основной задачей является не экономия ядерного топлива, а вытеснение органического топлива, поэтому экономическим является также и выработка электрической энергии конденсационным способом. Для АТЭЦ в большей степени оправдывается увеличение единичной мощности оборудования, так как при этом существенно уменьшаются показатели стоимости реактора. На АТЭЦ температура воды в подающих трубопроводах выше, чем в простых ТЭЦ. Пример схемы АТЭЦ приведен на рисунке 1.

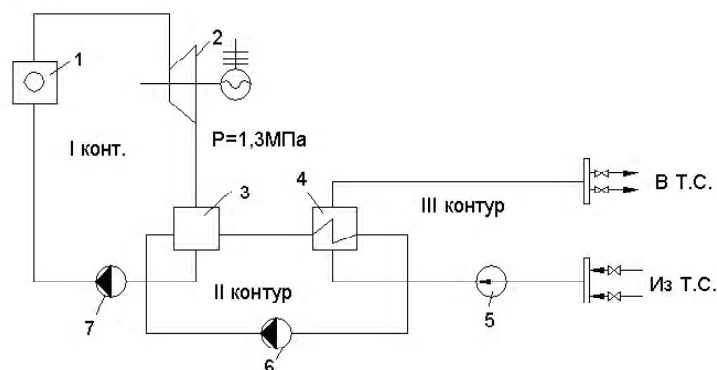


Рисунок 1 – Схема АТЭЦ: 1 – реактор кипящего типа; 2 – трубка с противодавлением; 3 – промежуточный теплообменник; 4 – сетевой подогреватель; 5 – сетевой насос; 6 – насос промежуточного II контура; 7 – питательный насос I контура.

Основные особенности АТЭЦ

1. Принципы атомной теплофикации коренным образом отличаются от теплофикации на органическом топливе. Это связано с тем, что на АТЭЦ значительно меньше топливная составляющая себестоимости электроэнергии, чем на ТЭЦ, где она равна 70 %.

2. На АТЭЦ существенно больше удельная стоимость капитальных затрат в основном за счет стоимости реакторов.

3. АТЭЦ работают на насыщенном паре, поэтому удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении будет меньше.

4. Необходимость организации целого ряда мероприятий по защите от попадания в сетевую воду и технологический пар радиоактивных загрязнений, с этой целью в тепловой схеме АТЭЦ предусмотрены дополнительные контуры, не менее трех.

5. Опыт создания и эксплуатации АЭС показывает, что проблема безопасности при нормальной эксплуатации практически решена, поэтому центральное место при создании атомных энергоисточников является обеспечение радиоактивной безопасности при аварийной ситуации.

6. Существенное отличие АТЭЦ от ТЭЦ по их воздействию на окружающую среду.

Основная задача при использовании теплоносителя от АТЭЦ для местных систем отопления, вентиляции и горячего водоснабжения состоит в предотвращении от попадания радиоактивных загрязнений в эти системы. С этой задачей могут справиться трехконтурные и более теплообменники, которые имеют контур промежуточного теплоносителя, который разделяет теплоноситель от АТЭЦ с теплоносителем системы отопления. Авторами предложена схема четырехконтурного ТО для независимой схемы присоединения систем ОВ и ГВ при использовании теплоносителя от АТЭЦ (рис. 2).

Первичный теплоноситель от АТЭЦ с температурой 150...180 °С поступает в трубное пространство первого контура, который расположен в межтрубном пространстве второго контура, в котором циркулирует промежуточный теплоноситель с помощью циркуляционного насоса ЦНПК, а уровень радиоактивных загрязнений контролируется постоянно специальными автоматическими радиометрами.

Во втором контуре по длине установлена перегородка для увеличения скорости движения промежуточного теплоносителя и интенсификации теплообмена. В системы отопления при теплоснабжении от АТЭЦ должен подаваться теплоноситель не менее, чем из третьего контура, а для систем

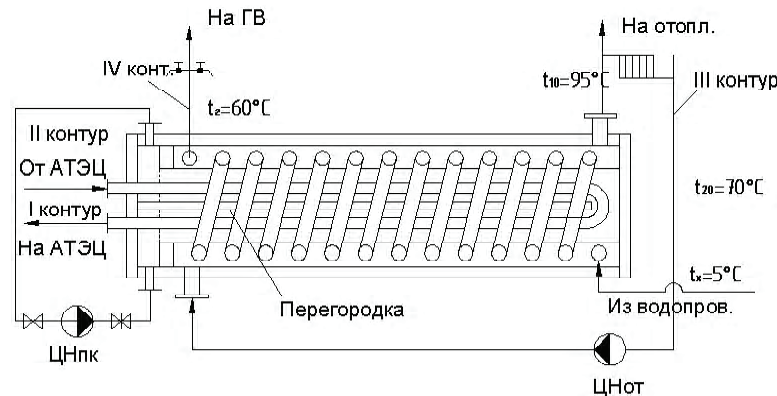


Рисунок 2 – Четырехконтурный ТО для независимой схемы присоединения систем ОВ и ГВ при использовании теплоносителя от АТЭЦ.

горячего водоснабжения не менее, чем из четвертого контура. Третий контур системы отопления нагревается через теплообменную поверхность, разделяющую второй контур от третьего. В третьем отопительном контуре размещен в виде змеевика четвертый контур, предназначенный для нагрева воды на нужды горячего водоснабжения.

Циркуляция воды в каждом отдельном контуре осуществляется своими: циркуляционными, сетевыми и подпиточными насосами. Для системы горячего водоснабжения (ГВ) используют повысительный насос, так как давление в городском водопроводе недостаточно для нормальной работы системы ГВ высотных зданий.

ВЫВОДЫ

Использование атомных энергоисточников в теплоснабжении зданий позволяет улучшить экологическую обстановку вследствие уменьшения вредных выбросов в атмосферу по сравнению с энергоисточниками на органическом топливе. Ослабить зависимость от изменения цен на топливо из-за низкой топливной составляющей в себестоимости вырабатываемой продукции и сдерживать рост тарифов на тепловую энергию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Олексюк, А. О. Энергоресурсосбережения при використанні нетрадиційних джерел [Текст] : навчальний посібник для студентів економічних спеціальностей в галузі теплогазопостачання та вентиляції / А. О. Олексюк, В. А. Сербін, Н. Ф. Радько. – Донецьк : ДАЖКГ Держжитлокомунгоспу України, 2004. – 156 с.
2. Олексюк, А. А. Энергоресурсосберегающие технологии для систем теплоснабжения [Текст] / А. А. Олексюк. – Макеевка : ДонНАСА, 2005. – 204 с. – ISBN 966-7477-54-1.
3. Кесслер, Г. Ядерная энергетика [Текст] : пер. с англ. / Г. Кесслер. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 264 с.
4. Петросьянц, Андраник Мелконович. Ядерная энергетика [Текст] / Андраник Мелконович Петросьянц. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1981. – 272 с. – (Наука и технический прогресс).
5. Байков, Н. М. Прогноз развития отраслей ТЭК в мире и по основным регионам до 2030 г. [Текст] / Н. М. Байков, Р. Н. Гринкевич. – М. : ИМЭМО РАН, 2009. – 82 с.

Получено 12.10.2017

А. О. ОЛЕКСЮК, А. О. РУСАКОВА, К. О. РУСАКОВА
ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ БУДИНКІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕПЛОНОСІЯ ВІД АТЕЦ
ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

Анотація. Розглянуто можливість використання теплоносія від АТЕЦ для теплопостачання будівель за допомогою теплофікації. Представлена схема чотирьох-контурного ТО для незалежної схеми приєднання систем ОВ і ГВ при використанні теплоносія від АТЕЦ. Розглянуто застосування ядерного палива для теплопостачання.

Ключові слова: теплоелектроцентрально (ТЕЦ), атомнотеплоелектроцентрально (АТЕЦ), теплопостачання.

ANATOLIY OLEKSYUK, ANASTASIA RUSAKOVA, EKATERINA RUSAKOVA
HEATING OF BUILDINGS WITH HEAT CARRIER FROM NTPP

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The possibility of using a coolant from a nuclear power plant for heat supply of buildings with the help of heating has been considered. A scheme of a four-circuit maintenance system for an independent circuit for connecting the OB and HW systems when using a coolant from an APEC has been presented. The use of nuclear fuel for heat supply has been considered.

Key words: thermal power plant (TPP), the nuclear thermal power plant (NTPP), heat.

Олексюк Анатолій Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергоресурсосбережение в системах теплоснабжения с помощью индивидуальных тепловых пунктов, электрокалориферов с высокотемпературными электродами, отопительных доводчиков.

Русакова Анастасия Александровна – магистрант кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергоресурсосбережение в системах теплоснабжения с помощью индивидуальных тепловых пунктов.

Русакова Екатерина Александровна – магистрант кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергоресурсосбережение в системах теплоснабжения с помощью индивидуальных тепловых пунктов.

Олексюк Анатолій Олексійович – доктор технічних наук, професор кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергоресурсозбереження в системах теплопостачання за допомогою індивідуальних теплових пунктів, електрокалориферів з високотемпературними електродами, опалювальні доводчики.

Русакова Анастасія Олександрівна – магістрант кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергоресурсозбереження в системах теплопостачання за допомогою індивідуальних теплових пунктів.

Русакова Катерина Олександрівна – магістрант кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергоресурсозбереження в системах теплопостачання за допомогою індивідуальних теплових пунктів.

Oleksuyk Anatoliy – Sc. D. (Eng.), Professor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests. Scientific interest: saving of energy in systems of heat supplying with a help of individual warmth.

Rusakova Anastasia – master's student, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interest: saving of energy in systems of heat supplying with a help of individual warmth.

Rusakova Ekaterina – master's student, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interest: saving of energy in systems of heat supplying with a help of individual warmth.

УДК 628.511

С. И. МОНАХ, Л. Ю. ПАНЧЕНКО, А. И. ЦХВЕДИАНИ

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

СПОСОБЫ ОЧИСТКИ И ОБОГАЩЕНИЯ ГАЗА, ПОЛУЧЕННОГО В БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКЕ

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос о способах очистки метана, полученного из биогаза, от вредных примесей. Известно, что на сегодняшний день существует три основных способа очистки биогаза: метод жидкого (мокрого) и твердого (сухого) химического поглощения примесей (абсорбционный и адсорбционный), метод мембранного разделения и вымораживания (криогенный метод). Удаление влаги из биогаза совершается механическим путем, а также за счет снижения температуры. Небольшое количество сероводорода удаляется физическими или химическими средствами. Эффективным поглотителем сероводорода является активированный уголь. Выяснено, что на сегодняшний день самым экономически выгодным способом, позволяющим очистить биогаз от сероводорода, стала сухая очистка. Определено, что существует еще один комбинированный метод (мембранно-абсорбционный) разделения биогаза, который позволяет избежать дополнительных затрат энергии на нагрев химического сорбента и охлаждение газовой смеси - при криогенном методе очистки, или на повышение давления биогаза - при мембранном методе очистки. Так же установлено, что после процесса переработки биогаза возможна утилизация отходов из биогазовой установки. Сделаны выводы, что мембранно-абсорбционный метод разделения и очистки биогаза, является самым рациональным на сегодняшний день; рентабельность очистки газа до качества природного газа оправдывает себя лишь при большом расходе топлива; основная масса дохода перерабатывающими компаниями такого уровня появляется не от переработки биогаза или же его сжатия, а от производства биологических удобрений..

Ключевые слова: биогаз, биогазовая установка, утилизация отходов, биореактор, метан, сероводород, углекислота, растительная биомасса.

В статье рассмотрен вопрос о способах очистки метана, полученного из биогаза, от вредных примесей. Известно, что на сегодняшний день существует три основных способа очистки биогаза: метод жидкого (мокрого) и твердого (сухого) химического поглощения примесей (абсорбционный и адсорбционный), метод мембранного разделения и вымораживания (криогенный метод). Удаление влаги из биогаза совершается механическим путем, а также за счет снижения температуры. Небольшое количество сероводорода удаляется физическими или химическими средствами. Эффективным поглотителем сероводорода является активированный уголь. Выяснено, что на сегодняшний день самым экономически выгодным способом, позволяющим очистить биогаз от сероводорода, стала сухая очистка. Определено, что существует еще один комбинированный метод (мембранно-абсорбционный) разделения биогаза, который позволяет избежать дополнительных затрат энергии на нагрев химического сорбента и охлаждение газовой смеси – при криогенном методе очистки, или на повышение давления биогаза – при мембранном методе очистки. Так же установлено, что после процесса переработки биогаза возможна утилизация отходов из биогазовой установки. Сделаны выводы, что мембранно-абсорбционный метод разделения и очистки биогаза, является самым рациональным на сегодняшний день; рентабельность очистки газа до качества природного газа оправдывает себя лишь при большом расходе топлива; основная масса дохода перерабатывающими компаниями такого уровня появляется не от переработки биогаза или же его сжатия, а от производства биологических удобрений.

Ключевые слова: биогаз, биогазовая установка, утилизация отходов, биореактор, метан, сероводород, углекислота, растительная биомасса.

Еще в 1776 году ученый Аллесандро Вольта сделал вывод о том, что существует взаимная зависимость между массой разлагающегося вещества и объемом выделяющегося газа, а позднее было обнаружено, что основным горючим компонентом, получаемым из биогаза, является метан.

Биогаз – продукт, который получается при разложении органических веществ. В процессе гниения, т. е. брожения, выделяются газы, собрав которые можно обеспечить нужды собственного хозяйства. С развитием микробиологии было выявлено, что выделение газа происходит из-за водородного и метанового брожения биомассы.

Основной способ применения биогаза – превращение его в источник тепловой, механической и электрической энергии. В процессе изучения биогаза начали появляться установки для его промышленного производства. Оборудование, в котором происходит данный процесс, называют «биогазовая установка». Первые экспериментальные установки для получения биогаза разрабатывались методом проб и ошибок, без истинного понимания происходящих в них процессов.

Крупные биогазовые установки можно использовать для создания производств по получению ценных химических продуктов для народного хозяйства.

На биогазе могут работать газосжигающие устройства, вырабатывающие энергию, которая используется для отопления, освещения, снабжения кормоприготовительных цехов, для работы водонагревателей, газовых плит, инфракрасных излучателей и двигателей внутреннего сгорания.

Первая документально подтвержденная биогазовая установка была построена в 1859 году в Индии, а в 1895 году впервые в Великобритании биогаз начал применяться в уличных фонарях освещения.

Современную биогазовую установку представлена на рисунке 1.

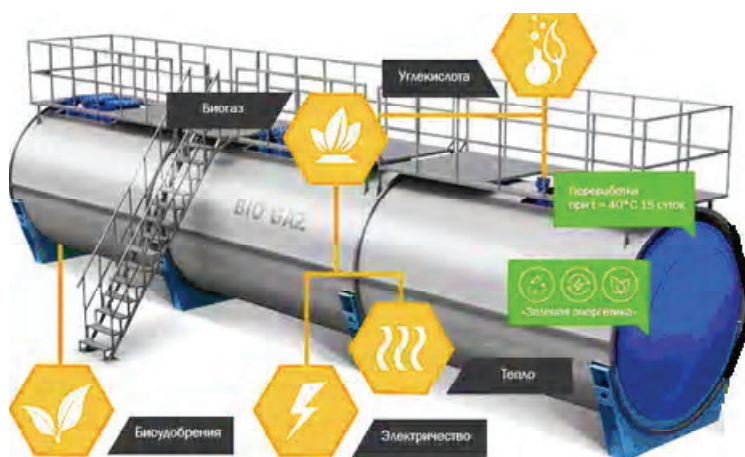


Рисунок 1 – Современная биогазовая установка.

Современные исследования химиков открывают большие возможности использования метана для производства ценных химических продуктов на базе больших биогазовых установок.

Для того, чтобы использовать метан, биогаз необходимо подвергнуть переработке в многостадийном процессе биогазовой установки (рисунок 2) и удалить нежелательные соединения, к которым относятся влага, аммиак, углекислый газ, сероводород.

Примерный состав биогаза приведен на рисунке 3: метан – 60...70 %; углекислый газ – 26...36 %; другие газообразные вещества, в том числе и сероводород, придающий газу неприятный запах, аммиак и водород – 4 %.

Избежать большого количества вредных примесей можно путем подбора наиболее подходящего биологического вещества, из которого, собственно, и производится биогаз, но в любом случае очистка и обогащение полученного биогаза необходимы.

На сегодняшний день существует три основных способа очистки биогаза: метод жидкого (мокрого) и твердого (сухого) химического поглощения примесей (абсорбционный и адсорбционный), метод мембранного разделения и вымораживания (криогенный метод).

Проблема содержания влаги в биогазе более чем актуальна. Её удаление из биогаза совершается механическим путем, а также за счет снижения температуры. Биогаз пропускают по подземной

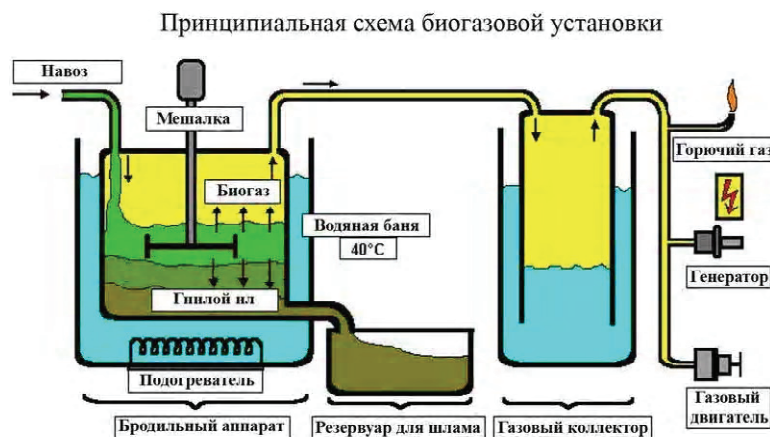


Рисунок 2 – Принципиальная схема биогазовой установки.

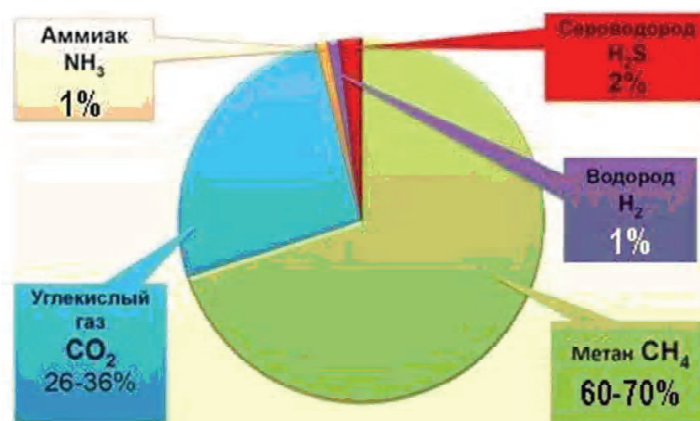


Рисунок 3 – Состав биогаза.

трубе, где влага конденсируется из-за уменьшения температуры. После этого газ по трубопроводу поднимают на поверхность, в процессе чего его температура повышается. Процесс извлечения лишней влаги из биогаза достаточно трудоемкий и сложный.

Наиболее вредным компонентом биогаза является сероводород, его содержание может достигать 3 %, очень токсичен, обладает неприятным запахом. Совместно с водяными парами, а особенно в комбинации с углекислым газом, вызывает коррозию металлических поверхностей газооборудования, именно по этой причине биогаз опасно использовать в двигателях и обогревателях взаимодействующих с водой. При сжигании биогаза сероводород переходит в оксиды серы, при этом они, взаимодействуя с водяным паром, образуют серную и сернистую кислоты, которые также являются коррозионно-активными.

Небольшие количества сероводорода удаляются физическими или химическими средствами, например очисткой напором воды (под высоким давлением), мембранными процессами, адсорбцией с колебаниями давления или аминовой очисткой.

Сущность метода промывки водой под давлением состоит в различном уровне растворимости углекислого газа и метана в воде. Но при способах очистки напором воды и адсорбции с колебаниями давления происходят относительно высокие потери метана, примерно 2...5 % от всего метана, содержащегося в биогазе, а также его дополнительное увлажнение.

Биогаз на выходе из реактора подвергается предварительной очистке от вынесенных капель воды, а затем последовательно сжимается. Некоторые из этих способов также удаляют воду или аммиак.

Эффективным поглотителем сероводорода является активированный уголь, однако очистку газов активными углями проводят при концентрации загрязнителя до 5 г/м³, а плотность используемых активных углей составляет 200...520 кг/м³. Схема отчистки газа представлена на рисунке 4.

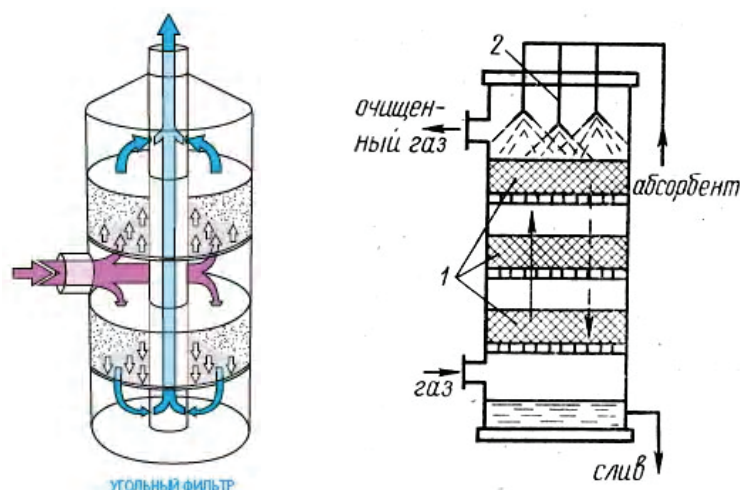


Рисунок 4 – Очистка газов активными углями.

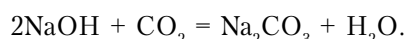
При адсорбции биогаз сначала проходит через специально обработанный активированный уголь, где сероводород окисляется до серы. Водяной пар, содержащийся в биогазе, адсорбируется на активированном угле, и перед следующим этапом очистки биогаза проводят осушку. Далее газ пропускают через очередную насадку с активированным углем, на которой адсорбируются галогенсодержащие углеводороды.

В биогазовых установках небольшой мощности применяют адсорбционный («сухой») способ удаления сероводорода, при больших расходах биогаза, с высоким содержанием сероводорода, очистку производят абсорбционным («мокрым») способом.

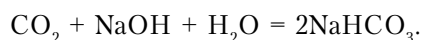
На сегодняшний день, самым экономически выгодным способом, позволяющим очистить биогаз от сероводорода, стала сухая очистка.

В отличие от удаления из биогаза сероводорода, уголекислоту отделить не так легко и дешево. Считается, что ее можно отделить, впитав в известковое молоко. Но, как показывает практика, это может привести к появлению большого количества извести, что является негативным фактором.

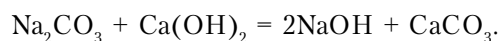
Щелочная очистка биогаза от уголекислоты водным раствором едкого натрия (NaOH) основана на необратимой реакции:



Парциальное давление уголекислого газа над раствором едкого натрия (NaOH), в процессе поглощения, равно нулю до тех пор, пока вся щёлочь не перейдет в карбонат. Поглощение уголекислого газа раствором карбоната натрия протекает с образованием бикарбоната:



Удельная теплота растворения уголекислого газа в растворах едких щелочей составляет 117 кДж/моль. Скорость абсорбции уголекислого газа щелочью возрастает с повышением температуры. Регенерация отработанного раствора щелочи осуществляется известью:



Процесс проходит в жидкой фазе при 90...95 °С и её перемешивании. Установка регенерации щелочи известью является громоздкой, и процесс недостаточно удовлетворяет современным санитарно-гигиеническим требованиям. Водные растворы отработанного щелока пытаются использовать для вспомогательных процессов нейтрализации и сбрасывают в специальные системы химически загрязненных стоков. На очистку 1 000 м³ газа расходуется 0,15...1,60 кг 92%-ой каустической соды.

Но большинство из вышеназванных способов являются энергоемкими и приводят к значительным потерям метана.

В настоящее время мембранно-абсорбционный метод разделения биогаза представляется наиболее перспективным. Эта технология объединяет в себе достоинства абсорбционного и мембранного методов разделения. Также как и в классическом методе химического поглощения, уголекислый газ

здесь «захватывается» жидким абсорбентом. Однако здесь нет непосредственного контакта фаз – жидкость и газ разделяет мембрана. Благодаря такой технологии не требуется повышать давление биогаза для подачи его на мембрану – газ поступает из биореактора самотёком под давлением чуть выше атмосферного.

Во время движения потока биогаза вдоль мембраны углекислый газ отводится через мембрану в подвижную жидкую фазу абсорбента, и концентрация «непроникающего» метана в биогазе резко возрастает. Мембранный модуль устроен как этажерка – жидкость/газ/жидкость/газ, – и собран в герметичный коллектор. Если поместить мембранную систему на выходе из биореактора, то углекислота будет отводиться, и этим можно добиться извлечения метана требуемой чистоты. Углекислый газ в дальнейшем удаляется сдувкой и подаётся по трубам в парники.

Такой комбинированный метод очистки биогаза позволяет избежать дополнительных затрат энергии на нагрев химического сорбента и охлаждение газовой смеси – при криогенном методе очистки, или на повышение давления биогаза – при мембранном методе очистки.

Важной проблемой технологии получения биогаза является утилизация отходов из биогазовой установки после процесса переработки сырья.

Данное производство, основанное на органических отходах, можно считать практически безотходным, так как все отходы, которые образуются в результате получения топлива, поступают обратно в производство. Их задачей является разбавление основного сырья для улучшения процесса измельчения и перемешивания. Отходы органической жидкости имеют температуру близкую к температуре биомассы, находящейся в биореакторе, и содержат штаммы метанобразующих бактерий. При их участии образуется большее количество метана и диоксида углерода.

Переработанные в биогазовых установках органические отходы превращаются в биомассу, которая содержит значительное количество питательных веществ и может быть использована в качестве биоудобрения и кормовых добавок, схема представлена на рисунке 5.

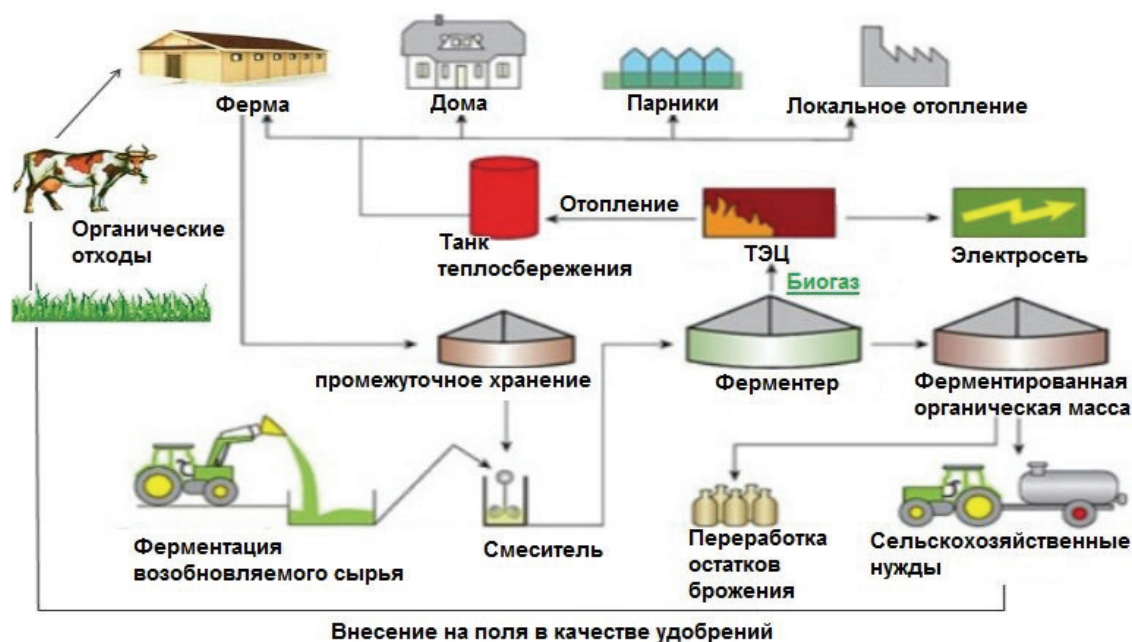


Рисунок 5 – Использование биогаза и отходов из биогазовой установки.

Образующиеся при сбраживании гумусные материалы улучшают физические свойства почвы, а минеральные вещества служат источником энергии и питанием для деятельности почвенных микроорганизмов, что способствует повышению усвоения питательных веществ растениями.

В ходе проведенных многочисленных экспериментов ученые выяснили, что навоз и птичий помет, взятые в качестве сырья для производства биогаза, подходят наилучшим образом.

ВЫВОДЫ

1. Технология производства биогаза предоставляет шанс дешевой утилизации органических отходов в биогазовых установках, позволяя частично сократить расходы и получить при этом газообразное топливо и качественные минерализованные азотные удобрения для сельского хозяйства.
2. Как показали аналитические исследования, мембранно-абсорбционный метод разделения и очистки биогаза является самым рациональным на сегодняшний день.
3. Рентабельность очистки газа до качества природного газа оправдывает себя лишь при большом расходе топлива. Установлено, что система очистки оправдывает себя для установок, производящих газ от 250 м³/час.
4. Важно отметить, что основная масса дохода перерабатывающими компаниями такого уровня появляется не от переработки биогаза или же его сжатия, а от производства биологических удобрений.
5. Предварительные расчеты показывают, что из 1 тонны растительной биомассы, смешанной с отходами, можно получить 350 м³ газообразного топлива (метан, водород) с энергоемкостью 8 786 МДж, 430 л жидкого топлива с энергоемкостью 12 887 МДж и твердое топливо, эквивалентное 834 МДж энергии. Таким образом, из 1 тонны такого сырья можно получить 0,1...0,4 тонны у.т. (условного топлива), а также 0,8...0,9 тонны обеззараженных удобрений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Северилов, П. В. Книга для начинающих о биогазовых установках и технологиях [Электронный ресурс] / П. В. Северилов // Самиздат, 2012. – 4 марта. – Режим доступа : http://samlib.ru/s/sewerilow_p_w/biogas_for_dummies.shtml.
2. Получение биогаза. Основные теории [Электронный ресурс] // Информационный ресурс. Альтернативное электричество. – [Б. м. : infoelectrik.ru], 2015. – Режим доступа : <http://infoelectrik.ru/alternativnoe-elektrichestvo/poluchenie-biogaza-osnovy.html>.
3. Гюнтер, Лотар Способ и система очистки биогаза для извлечения метана [Электронный ресурс] / Лотар Гюнтер. – [Б. м. : findpatent.RU], [2012–2017]. – Режим доступа : <http://www.findpatent.ru/patent/249/2495706.html>.
4. Полетаева, М. А. Пути решения проблемы очистки сточных вод молочного предприятия [Текст] / М. А. Полетаева, О. С. Осадчая, Н. А. Рузаева // Ползуновский вестник. – № 1, 2013. – С. 273–275.
5. Полищук И. И. Водопользование на предприятиях пищевой промышленности [Текст] / И. И. Полищук. – М. : Агропромиздат, 1989. – 100 с.
6. Маркова, В. А. Использование биогаза для получения электроэнергии в агропромышленных комплексах [Текст] / В. А. Маркова, С. Н. Деревянин, С. П. Шимченко // Грузовик. – № 3. – 2014. – С. 41–48.
7. Пат. 2460575. Российская Федерация, МКП В01D53/62. Способы разделения биогаза и очистка его составляющих [Текст] / Б. А. Кривой, А. В. Луканин, Т. В. Тахтарова ; патентообладатель ООО Научно-производственное предприятие «Экология мегаполиса». – № 2011110159/05; заявл. 18.03.2011 ; опубл. 10.09.2012 ; Бюл. № 25. – 8 с.
8. Веденеев, А. Г. Использование продуктов применения биогазовых технологий [Электронный ресурс] / А. Г. Веденеев, Т. А. Веденева // Альтернативные источники энергии. Энциклопедия радиоэлектроники и электротехники. – [2015]. – Режим доступа : <http://www.diagram.com.ua/list/alter-energy/alter-energy036.shtml>.
9. Лаврухина, О. С. Стимуляторы выработки биогаза [Электронный ресурс] / О. С. Лаврухина // Современные научные исследования и инновации. – № 5. – 2012. – Режим доступа : <http://web.snauka.ru/issues/2012/05/13035>.

Получено 11.10.2017

С. І. МОНАХ, Л. Ю. ПАНЧЕНКО, А. І. ЦХВЕДІАНИ СПОСОБИ ОЧИЩЕННЯ І ЗБАГАЧЕННЯ ГАЗУ, ОТРИМАНОГО В БІОГАЗОВІЙ УСТАНОВЦІ ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

Анотація. У статті розглянуто питання про способи очищення метану, отриманого з біогазу, від шкідливих домішок. Відомо, що на сьогодні існує три основних способи очищення біогазу: метод рідкого (мокрого) і твердого (сухого) хімічного поглинання домішок (абсорбційний і адсорбційний), метод мембранного поділу і виморожування (вакуумний метод). Видалення вологи з біогазу відбувається механічним шляхом, а також за рахунок зниження температури. Невелика кількість сірководню видаляється фізичними або хімічними засобами. Ефективним поглиначем сірководню є активоване вугілля. З'ясовано, що на сьогодні найбільш економічно вигідним способом, що дозволяє очистити біогаз від сірководню, стало сухе очищення. Визначено, що існує ще один комбінований метод (мембранно-абсорбційний) поділу біогазу, який дозволяє уникнути додаткових витрат енергії на нагрів хімічного сорбенту і охолодження газової суміші – при криогенному методі очищення, або на підвищення

тиску біогазу – при мембранному методі очищення. Також встановлено, що після процесу переробки біогазу можлива утилізація відходів з біогазової установки. Зроблено висновки, що мембранно-абсорбційний метод розділення і очищення біогазу є найбільш раціональним на сьогодні; рентабельність очищення газу до якості природного газу виправдовує себе лише при великій витраті палива; основна маса доходу переробними компаніями такого рівня надходить не від переробки біогазу або ж його стиснення, а від виробництва біологічних добрив.

Ключові слова: біогаз, біогазова установка, утилізація відходів, біореактор, метан, сірководень, вуглекислота, рослинна біомаса.

SVETLANA MONAKH, LYUDMILA PANCHENKO, ALEXANDRA TSKHVEDIANI METHODS FOR CLEANING AND ENRICHING THE GAS OBTAINED IN A BIOGAS PLANT

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The article has considered the issue of how to purify methane, derived from biogas, from harmful impurities. It has been known that today there are three main ways of cleaning biogas: the method of liquid (wet) and solid (dry) chemical absorption of impurities (absorption and adsorption), the method of membrane separation and freezing (cryogenic method). The removal of moisture from biogas is accomplished mechanically, and also due to a decrease in temperature. A small amount of hydrogen sulphide is removed by physical or chemical means. An effective absorber of hydrogen sulphide is activated carbon. It has been found out that for today the most economical method, allowing cleaning biogas from hydrogen sulphide, was dry cleaning. It has been determined that there is another combined method (membrane-absorption) of biogas separation, which allows to avoid additional energy costs for heating the chemical sorbent and cooling the gas mixture – with the cryogenic method of cleaning, or for increasing the biogas pressure – with the membrane cleaning method. It has been also established that after the process of processing biogas it is possible to utilize waste from a biogas plant. It has been concluded that the membrane-absorption method of separation and purification of biogas is the most rational for today; the profitability of gas cleaning to the quality of natural gas justifies itself only with a high fuel consumption; the bulk of income by processing companies of this level does not arise from the processing of biogas or its compression, but from the production of biological fertilizers.

Key words: biogas, biogas plant, waste utilization, bioreactor, methane, hydrogen sulphide, carbonic acid, plant biomass.

Монах Светлана Игоревна – кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: процессы теплообмена в теплотехнических установках.

Панченко Людмила Юрьевна – бакалавр кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: теплообмен, котельные установки, газоснабжение, теплоснабжение.

Цхведиани Александра Игоревна – бакалавр кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: теплообмен, котельные установки.

Монах Світлана Ігорівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: процеси теплообміну в теплотехнічних установках.

Панченко Людмила Юрійвна – бакалавр кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: теплообмін, котельні установи, газопостачання, теплостачання.

Цхведіані Олександра Ігорівна – бакалавр кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: теплообмін, котельні установи.

Monakh Svetlana – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: processes of heat and mass transfer in heat engineering installations.

Panchenko Lyudmila – bachelor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: heat and mass exchange, boiler plants, gas supply, heat supply.

Tshvediani Alexandra – bachelor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: heat and mass exchange, boiler plants.

УДК 697.34

С. И. МОНАХ, Д. В. ВЫБОРНОВ, В. В. ПОПОВИЧ

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ Г. ЗУГРЕСА

Аннотация. В данной работе рассматриваются задачи повышения эффективности систем централизованного теплоснабжения путем оптимизации тепловых и гидравлических эксплуатационных режимов. Рассмотрены вопросы разработки, управления, контроля и анализа теплогидравлических режимов на примере системы централизованного теплоснабжения города Зугреса. Отражены результаты проведенных исследований, на основании которых рекомендованы теплогидравлические режимы отдельных частей системы теплоснабжения города, а также способы оперативного централизованного регулирования тепловых режимов с учетом динамических свойств системы централизованного теплоснабжения.

Ключевые слова: теплогидравлический режим, тепловая сеть, оптимизация систем теплоснабжения, горячее водоснабжение, тепловая нагрузка.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

В нашем регионе сохраняется высокий уровень централизации теплоснабжения. Теплоснабжение городских населенных пунктов обычно обеспечивается такими тепловыми источниками, как котельные или теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) различной мощности. Неэффективный процесс теплоснабжения приводит к огромному перерасходу энергетических, материальных и финансовых ресурсов, претензиям потребителей тепла. В условиях постоянного увеличения цен на энергоносители эффективное использование энергетических ресурсов стало одним из самых актуальных и приоритетных направлений государственной политики. Эффективность функционирования систем централизованного теплоснабжения во многом зависит от режимов работы тепловых сетей и систем теплопотребления. Поэтому задача оптимизации режимов, проведения наладки и регулирования тепловых и гидравлических режимов в сложных системах крупных городов является весьма актуальной.

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ

Зугрэс – город районного значения. Расположен в центральной части Донецкой области на реке Крынке (приток Миуса), в 12 км к юго-востоку от Харцызска. В административном отношении город также подчиняется Харцызску.

Теплоснабжение всей старой части города Зугреса обеспечивается Зуевской экспериментальной ТЭЦ (ЗуЭТЕЦ). Присоединенная нагрузка на горячую воду составляет 36 % от полной нагрузки на теплоснабжение (59,8 МВт). При этом выработка тепловой и электрической энергии осуществляется по комбинированному циклу.

Проблема вызвана тем, что до сих пор теплоснабжение старой части города Зугрэс осуществляется от ЗуЭТЭЦ, оборудование которой морально и физически устарело и не может гарантировать стабильное теплоснабжение жилых домов и объектов социальной сферы в течение отопительного периода.

Протяженность магистральных тепловых сетей в городе составляет 3,8 км тепловых сетей (в однотрубном исчислении) средним диаметром 250 мм. При этом полностью отсутствуют тепловые пункты, т. к. горячее водоснабжение осуществляется по открытой схеме, что добавляет сложности в

регулировании тепловой нагрузки, а также увеличивает нагрузку на цех водоподготовки ЗуЭТЭЦ. Системами автоматического регулирования отопительно-вентиляционной нагрузки и ГВС потребители не оснащены.

Схема тепловых сетей от тепловых источников характеризуется своей сложностью, а именно: схема теплоснабжения тупиковая, большой перепад геодезических отметок источника и конечного потребителя (около 40 м), низкая резервируемость. Тепловой источник работает по расчетному температурному графику 95/70 °С.

ЦЕЛЬ

Целью данной статьи является анализ путей оптимизации схемы теплоснабжения старой части г. Зугрэса, что давно является острой проблемой. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства республики поручило ученым академии разработать оптимизированную схему теплоснабжения и предложить рекомендации по предпроектным решениям.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Оптимизация режимов работы тепловых сетей относится к организационно-техническим мероприятиям, не требующих значительных финансовых затрат на внедрение, но приводящая к значительному экономическому результату и снижению затрат на топливно-энергетические ресурсы. Разработка оптимальных тепло-гидравлических режимов тепловых сетей г. Зугрэса и мероприятий по их организации выполнялась в следующей последовательности.

Произведен сбор и проверка исходных данных. В результате обследования выявлены фактические эксплуатационные режимы, уточнен тип и состояние оборудования системы теплоснабжения, определены характер и величина тепловых нагрузок. На объекте проведен тщательный осмотр всех тепловых камер и абонентских вводов. Выполнены инструментальные измерения расхода и параметров теплоносителя по основным магистралям и ответвлениям, уточнены характеристики нестандартного оборудования и геометрические параметры тепловых сетей.

Достижение оптимальных гидравлических и тепловых режимов в тепловых сетях и системах теплоснабжения города можно обеспечить корректным потокораспределением для поддержания заданного температурного режима у потребителей тепловой энергии. Важной задачей оптимизации режимов работы тепловых сетей является регулирование отпуска теплоты в системах теплоснабжения для поддержания комфортной температуры в отапливаемых помещениях при изменяющихся на протяжении всего отопительного периода при имеющихся внешних климатических условиях и постоянной температуре воды, поступающей в систему горячего водоснабжения. Выполнение этого условия является одним из критериев оценки эффективности системы.

Оптимизация теплогидравлических режимов и эффективность работы системы централизованного теплоснабжения во многом зависит от применяемого метода регулирования тепловой нагрузки. Основные способы регулирования могут быть определены из анализа совместного решения уравнений теплового баланса нагревательных приборов и уравнения теплопередачи по общеизвестным формулам [3, 4] и зависят от: температуры теплоносителя; расхода теплоносителя; коэффициента теплопередачи; площади поверхности теплообмена.

Централизованное регулирование от тепловых источников возможно осуществлять путем изменения двух величин: температуры и расхода теплоносителя. В целом регулирование отпуска тепловой энергии может осуществляться тремя способами:

- качественным, заключающимся в регулировании отпуска тепловой энергии путем изменения температуры теплоносителя на входе в прибор при сохранении постоянным количества расхода теплоносителя, подаваемого в регулируемую установку;
- количественным, заключающимся в регулировании отпуска теплоты путем изменения расхода теплоносителя при постоянной температуре на входе в регулируемую установку;
- качественно-количественным, заключающимся в регулировании отпуска теплоты путем одновременного изменения расхода и температуры теплоносителя.

Для поддержания комфортных условий внутри зданий регулирование должно быть минимум двухуровневым: централизованное (на источниках тепла) и местное (на тепловых пунктах).

В г. Зугрэсе централизованное регулирование является единственным видом управления и осуществляется в основном по нагрузке отопления путем изменения температуры теплоносителя в подающих трубопроводах в зависимости от метеорологических параметров, прежде всего от температуры наружного воздуха при условно постоянном расходе теплоносителя.

Широко используемый в практике график качественного регулирования отопительной нагрузки показывает зависимость температур теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах в зависимости от температуры наружного воздуха. Расчет графика производится по общеизвестным формулам, которые выводятся из уравнения баланса нагревательного прибора при расчетных и других температурных условиях [3, 7, 8].

Данные методики расчета температурных графиков центрального регулирования изначально разрабатывались для задач проектирования систем теплоснабжения, поэтому в них принят ряд допущений и упрощений, в частности условие стационарности процессов теплообмена. В действительности все теплообменные процессы, происходящие в элементах системы теплоснабжения, нестационарные, и эта особенность должна быть учтена при анализе и регулировании тепловой нагрузки. Однако на практике эта особенность не учитывается, и проектные графики используются при эксплуатации и оперативном управлении.

В соответствии с действующими нормативными документами [10] регулирование тепловой нагрузки предусматривается путем изменения температуры теплоносителя в подающей линии в соответствии с утвержденным для системы теплоснабжения температурным графиком, заданной по усредненной температуре наружного воздуха за промежуток времени в пределах 12...24 ч, определяемый диспетчером тепловой сети в зависимости от длины сетей, климатических условий и других факторов. Несмотря на достаточно простую формулировку пункта в данных правилах, данная задача является чрезвычайно сложной в условиях неопределенности внешних факторов, сложности схемы теплоснабжения, прогнозных данных с учетом фактического состояния оборудования систем централизованного теплоснабжения, в первую очередь тепловых сетей.

Увеличение расходов теплоносителя увеличивает наличие утечек. Поэтому данное регулирование возможно в условиях достаточности гидравлической устойчивости и резерва по оборудованию в перекачивающих насосных станциях.

Также следует отметить, что систематическое снижение температуры в подающих трубопроводах приводит к увеличению расходов теплоносителя с последующей разрегулировкой всей системы теплоснабжения.

Таким образом, разработку диспетчерского графика и централизованное регулирование отпуска тепла необходимо вести с учетом динамических характеристик системы теплоснабжения, аккумулирующих способностей зданий и переменности внешних и внутренних воздействий.

Увеличение периода регулирования до 24–48–72 ч и более в определенных пределах изменения внешних и внутренних воздействий практически не влияет на качество теплоснабжения потребителей, что дает возможность эксплуатировать оборудование в «мягком» режиме.

Оперативное регулирование с учетом вышеуказанных особенностей приводит к:

- 1) уменьшению вероятности повреждений трубопроводов и повышение надежности;
- 2) повышению экономичности:
 - при производстве энергии за счет разности приростов расхода топлива на выработку энергии на ТЭЦ при разных температурах теплоносителя;
 - при транспорте и распределении тепловой энергии за счет разности прироста тепловых потерь трубопроводами при разных температурах теплоносителя;
- 3) снижению количества пусков-остановок основного теплогенерирующего оборудования, что также повышает надежность и экономичность.

Основным критерием оптимизационной задачи при разработке тепловых и гидравлических режимов и перераспределения тепловых нагрузок является снижение затрат на производство и транспортировку тепловой энергии при имеющихся технологических ограничениях. К последним можно отнести: располагаемые мощности и характеристику оборудования тепловых источников, пропускную способность тепловых сетей и характеристики оборудования перекачивающих насосных станций, допустимые рабочие параметры систем теплоснабжения и т. д.

В городе Зугресе, в результате расчетно-аналитических исследований по оптимизации режимов функционирования тепловых сетей, проведенными работникам академии совместно с представителями местной исполнительной власти, планируется улучшить качество теплоснабжения потребителей и повысить эффективность всей системы централизованного теплоснабжения путем проведения следующих мероприятий:

- 1) сократить излишние расходы топлива за счет установки нового, гораздо более эффективного теплогенерирующего оборудования;
- 2) сократить расходы электроэнергии на перекачку теплоносителя на 40 % за счет применения новых энергоэффективных насосов;

3) сократить расходы топлива на выработку электроэнергии на ЗуЭТЭЦ за счет приведения в норму и снижения температуры обратной сетевой воды;

4) полностью исключить работу систем теплоснабжения «на сброс» по причине недостаточных располагаемых напоров;

5) сократить расходы подпиточной воды за счет отказа от открытой системы теплоснабжения;

6) полного перевода систем теплоснабжения на индивидуальные в тех случаях для тех многоквартирных домов, где услугами централизованного теплоснабжения пользуются единичные потребители;

7) устройство тепловых пунктов для приготовления горячей воды с помощью современных пластинчатых теплообменных аппаратов в непосредственной близости от потребителей (в подвальных помещениях).

По данным проведенных натурных исследований износ теплогенерирующего оборудования г. Зугреса составляет около 80...90 % и продолжает увеличиваться из-за сложностей в регулировании открытой системы теплоснабжения. Осуществлены теплогидравлические расчеты с составлением перечня наладочных мероприятий, в том числе рекомендованы регулирующие устройства для каждого теплового пункта.

Также рекомендуется три варианта по модернизации системы теплоснабжения для технико-экономической оценки инвестиций.

Первый вариант заключается в модернизации ТЭЦ в теплогенерирующую установку, работающую на существующую тепловую сеть с параметрами 95/70. Недостатком в данном случае являются заниженные скорости движения теплоносителя, что приведет к остыванию теплоносителя у конечного потребителя.

Второй вариант состоит в том, что модернизируемая в теплогенерирующую установку ТЭЦ обеспечивает теплоносителем с параметрами 95/70 потребителей посредством тепловой сети с оптимизированными диаметрами. Однако при данном сценарии необходимы значительные капитальные затраты на замену тепловых сетей.

Согласно третьему варианту теплоснабжение осуществляется от новой теплогенерирующей установки по имеющимся тепловым сетям, но с параметрами теплоносителя 85/70. Эта стратегия является наиболее выигрышной, т. к. практически соблюдается необходимый скоростной режим при существующих тепловых сетях. Недостатком данного варианта будет работа котлоагрегатов с неполной тепловой нагрузкой, что приведет к снижению эффективности использования сжигаемого топлива. Однако даже в этом случае система теплоснабжения после термомодернизации будет гораздо более эффективна по сравнению с исходной ситуацией.

ВЫВОДЫ

В данной работе показана возможность повышения эффективности водяных систем централизованного теплоснабжения за счет оптимизации тепловых и гидравлических режимов. Оптимизация режимов работы тепловых сетей относится к организационно-техническим мероприятиям, которая не требует значительных финансовых затрат на внедрение, но приводит к значительному экономическому результату и снижению затрат на топливно-энергетические ресурсы. Поддержание оптимальных режимов возможно только при соблюдении температурных режимов. Разработку диспетчерского графика и централизованное регулирование отпуска тепла необходимо вести с учетом динамических характеристик системы теплоснабжения, аккумулирующих способностей и переменности внешних и внутренних воздействий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковлев, Б. В. Повышение эффективности систем теплофикации и теплоснабжения [Текст] / Б. В. Яковлев. – М. : Новости теплоснабжения, 2008. – 448 с.
2. Автоматизированные системы теплоснабжения и отопления [Текст] / С. А. Чистович, В. К. Аверьянов, Ю. Я. Темпель, С. И. Быков. – Л. : Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. – 248 с.
3. Соколов, Е. Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов [Текст] / Е. Я. Соколов. – 7-е изд., стереот. – М. : Издательство МЭИ, 2001. – 472 с.
4. Методические рекомендации по оптимизации гидравлических и температурных режимов функционирования открытых систем коммунального теплоснабжения [Текст] / ЗАО «Роскоммунэнерго», Российская Ассоциация «Коммунальная Энергетика» им. Э. Хижа. – М. : ЗАО «Роскоммунэнерго», 2005. – 52 с.

5. СНиП 41-02-2003. Тепловые сети [Текст]. – Взамен СНиП 2.04.07-86* ; ввод в действие с 1 сент. 2003 г. – СПб. : Деан, 2004. – 95 с. – (Безопасность труда в России / Гос. ком. Рос. Федерации по стр-ву и жил.-комму. комплексу (Госстрой России)). – ISBN 5-93630-406-X.
6. Трубопроводные системы энергетики: Управление развитием и функционированием [Текст] / Н. Н. Новицкий, Е. В. Сеннова, М. Г. Сухарев [и др.]. – Новосибирск : Наука, 2004. – 461 с.
7. Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей [Текст] : Справочник / В. И. Манюк, Я. И. Каплинский, Э. Б. Хиж [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1988. – 432 с.
8. Николаев, А. А. Проектирование тепловых сетей: справочник проектировщика [Текст] / А. А. Николаев. – М. : Высш. шк., 1965. – 360 с.
9. СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование [Текст]. – Введ. в действие с 01.01.2004. – СПб. : Изд-во ДЕАН, 2004. – 142 с. – (Безопасность труда России / Гос. ком. Рос. Федерации по стр-ву и жил.-комму. комплексу (Госстрой России)). – ISBN 5-93630-425-6.
10. Правила технической эксплуатации тепловых установок [Текст] : утверждены Министерством энергетики Российской Федерации от 24.03.2003 № 115. – СПб. : Издательство ДЕАН, 2003. – 256 с.

Получено 08.10.2017

С. І. МОНАХ, Д. В. ВИБОРНОВ, В. В. ПОПОВИЧ
ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМИ
ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ М. ЗУГРЕСА
ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

Анотація. У даній роботі розглядаються питання підвищення ефективності систем централізованого теплопостачання шляхом оптимізації теплових і гідравлічних експлуатаційних режимів. Розглянуто питання розроблення, управління, контролю і аналізу теплогідравлічних режимів на прикладі системи централізованого теплопостачання міста Зугреса. Відображено результати проведених досліджень, на підставі яких рекомендовані теплогідравлічні режими окремих частин системи теплопостачання міста, а також способи оперативного централізованого регулювання теплових режимів з урахуванням динамічних властивостей системи централізованого теплопостачання.

Ключові слова: теплогідравлічний режим, теплова мережа, оптимізація систем теплопостачання, гаряче водопостачання, теплове навантаження.

SVETLANA MONAKH, DMITRY VYBORNOV, VITALY POPOVICH
RESEARCH OF THERMAL-HYDRAULIC OPERATION MODES OF THE
DISTRICT HEATING SYSTEM IN ZUGRES
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. In this paper, we consider the problems of increasing the efficiency of district heating systems by optimizing the thermal and hydraulic operating conditions. The issues of development, management, control and analysis of thermal and hydraulic regimes are considered on the example of the centralized district heating system in the city of Zugres. The results of the research have been carried out on the basis of which the heat and hydraulic regimes of some parts of the city's heat supply system are recommended, as well as the methods of operative centralized regulation of thermal regimes, taking into account the dynamic properties of the district heating system, are reflected.

Key words: thermo hydraulic mode, thermal network, optimization of heating systems, hot water, heat load.

Монах Светлана Игоревна – кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергосбережение в системах теплоснабжения при внедрении теплонасосных и когенерационных технологий производства энергоносителей.

Выборнов Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергосбережение в системах теплоснабжения, использование теплонасосных технологий.

Попович Виталий Валерьевич – магистрант кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергосбережение в системах теплоснабжения.

Монах Світлана Ігорівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергозбереження в системах теплопостачання при впровадженні теплонасосних та когенераційних технологій виробництва енергоносіїв.

Выборнов Дмитро Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергозбереження в системах теплопостачання, використання теплонасосних технологій.

Попович Віталій Валерійович – магістрант кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергозбереження в системах теплопостачання.

Monakh Svetlana – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: heat saving in heat supply systems with introduction of heat pump and cogeneration technologies of energy carry production.

Vybornov Dmitry – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: heat saving in systems of a heat supply with usage of heat pump technologies.

Popovich Vitaly – master's student, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: energy saving in heat supply systems.

СОДЕРЖАНИЕ

СЕРДЮК А. И., ЯЛАЛОВА М. М. Повышение техногенной безопасности при электрохимической переработке свинцовых аккумуляторов	5
ОРЛОВ С. М., РОМАНЕНКО Б. Р., ОРЛОВА А. Я. Перспективы использования электризации пыли для повышения энергоэффективности циклонов	11
ВЫСОЦКИЙ С. П., ГУЛЬКО С. Е. Экологические риски при эксплуатации и закрытии угольных шахт	18
ВОРОНОВА О. С. Теоретические основы геометрического моделирования конвективного теплообмена	26
НОВИЧКОВ Ю. А. Анализ количественных показателей продуктов пиролиза отработанных автотракторных шин	33
ЯЦКО И. П., МАКСИМОВА Н. А. Основные виды солнечных коллекторов, их достоинства и недостатки	39
КЛЯУС Б. В., ВЫБОРНОВ Д. В., САВИЧ Д. В. Анализ теплового потенциала уходящих газов производства огнеупорной промышленности	44
ПЛУЖНИК А. В., ВЫБОРНОВ Д. В. Тепловой контроль как вид мониторинга объектов ТГВ	50
ДАРИЕНКО О. Л. Совершенствование процессов очистки газов тепловых электростанций от диоксида серы с применением электродиализной технологии	55
КАЧАН В. Н., ЛУКЪЯНОВ А. В., КОНОПАЦКИЙ Е. В. Совершенствование расчёта элементов конвективной части жаротрубных водогрейных котлоагрегатов	62
ГНИТИЁВ П. А. Исследование теплообменных характеристик продуктов сгорания при сжигании биогаза	67
УДОВИЧЕНКО З. В., МИХАЙСКАЯ О. В., УДОВИЧЕНКО Н. Р. Нормирование параметров микроклимата	72
НАСОНКИНА Н. Г., МАРКИН В. В., АНТОНЕНКО С. Е., ЖУКОВ Э. И., МАРОЗЮК М. В., ПИЛИПЕНКО Е. И., БЕРЕЗА П. Г. Стратегия оценки риска и модернизации канализационных очистных сооружений	78
ТУРЧИНА Г. С. Математический подход к решению задач надёжности с учетом значимости трубопроводов в кольцевых системах водоснабжения	88
ДАВЫДОВ Р. А., МОНАХ С. И. Метод оценки теплозащиты стены здания с вентилируемым фасадом с учетом продольной фильтрации воздуха	94
ШАЦКОВ А. О., ВАКУЛОВИЧ В. Л., ЛЫХАЧ А. В. Теоретические аспекты использования низкотемпературных систем лучистого отопления в жилых зданиях	99
ГУСЕНЦОВА Я. А., КОВАЛЕНКО А. А., ПИЛАВОВ М. В., КОПЕЦ К. К. Выбор регулятора для теплогенерирующего объекта	104
ОЛЕКСЮК А. А., РУСАКОВА А. А., РУСАКОВА Е. А. Теплоснабжение зданий с использованием теплоносителя от АТЭЦ	110
МОНАХ С. И., ПАНЧЕНКО Л. Ю., ЦХВЕДИАНИ А. И. Способы очистки и обогащения газа, полученного в биогазовой установке	115
МОНАХ С. И., ВЫБОРНОВ Д. В., ПОПОВИЧ В. В. Исследование теплогидравлических режимов работы системы централизованного теплоснабжения г. Зугреса	123

ЗМІСТ

СЕРДЮК О. І., ЯЛАЛОВА М. М. Підвищення техногенної безпеки при електрохімічній переробці свинцевих акумуляторів	5
ОРЛОВ С. М., РОМАНЕНКО Б. Р., ОРЛОВА А. Я. Перспективи використання електризації пилу для підвищення енергоефективності циклонів	11
ВИСОЦЬКИЙ С. П., ГУЛЬКО С. Є. Екологічні ризики при експлуатації та закритті вугільних шахт	18
ВОРОНОВА О. С. Теоретичні основи геометричного моделювання конвективного теплообміну	26
НОВІЧКОВ Ю. О. Аналіз кількісних показників продуктів піролізу відпрацьованих автотракторних шин	33
ЯЦКО І. П., МАКСИМОВА Н. А. Основні види сонячних колекторів, їх переваги і недоліки	39
КЛЯУС Б. В., ВИБОРНОВ Д. В., САВИЧ Д. В. Аналіз теплового потенціалу газів виробництва вогнетривкої промисловості	44
ПЛУЖНИК А. В., ВИБОРНОВ Д. В. Тепловий контроль як вид моніторингу об'єктів ТГВ	50
ДАРІЄНКО О. Л. Удосконалення процесів очищення газів теплових електростанцій від діоксиду сірки із застосуванням електродіалізної технології	55
КАЧАН В. М., ЛУК'ЯНОВ О. В., КОНОПАЦЬКИЙ Є. В. Вдосконалення розрахунку елементів конвективної частини жаротрубних водогрійних котлоагрегатів	62
ГНІТІЙОВ П. А. Дослідження теплообмінних характеристик продуктів згоряння при спалюванні біогазу	67
УДОВИЧЕНКО З. В., МИХАЙСЬКА О. В., УДОВИЧЕНКО М. Р. Нормування параметрів мікроклімату	72
НАСОНКІНА Н. Г., МАРКІН В. В., АНТОНЕНКО С. Є., ЖУКОВ Е. І., МАРОЗЮК М. В., ПИЛИПЕНКО К. І., БЕРЕЗА П. Г. Стратегія оцінки ризику і модернізації каналізаційних очисних споруд	78
ТУРЧИНА Г. С. Математичний підхід до розв'язання задач надійності з врахуванням значущості трубопроводів у кільцевих системах водопостачання	88
ДАВИДОВ Р. О., МОНАХ С. І. Метод оцінки теплозахисту стіни будинку з вентиляованих фасадів із урахуванням повздовжніх фільтрації повітря	94
ШАЦКОВ А. О., ВАКУЛОВИЧ В. Л., ЛИХАЧ А. В. Теоретичні аспекти використання низькотемпературних систем променевого опалення в житлових будинках	99
ГУСЕНЦОВА Я. А., КОВАЛЕНКО А. О., ПЛАВОВ М. В., КОПЕЦЬ К. К. Вибір регулятора для теплогенеруючого об'єкта	104
ОЛЕКСЮК А. О., РУСАКОВА А. О., РУСАКОВА К. О. Теплопостачання будинків з використанням теплоносія від АТЕЦ	110
МОНАХ С. І., ПАНЧЕНКО Л. Ю., ЦХВЕДІАНІ А. І. Способи очищення і збагачення газу, отриманого в біогазовій установці	115
МОНАХ С. І., ВИБОРНОВ Д. В., ПОПОВИЧ В. В. Дослідження теплогідравлічних режимів роботи системи централізованого теплопостачання м. Зугреса	123

CONTENTS

SERDYUK ALEXANDER, YALALOVA MARGARITA. Increase of Technogenic Safety in Electrochemical Processing of Lead-Acid Batteries	5
ORLOV STANISLAV, ROMANENKO BORIS, ORLOVA ALLA. Prospects for the use of Electrification of Dust to Increase the Efficiency of the Cyclones	11
VYSOTSKY SERGEY, GULKO SERGEY. Environmental Risks in the Operation and Closure of Coal Mines	18
VORONOVA OLGA. Theoretical Foundations of Geometrical Modeling of Convective Heat Exchange	26
NOVICHKOV YURI. Analysis of Quantitative Indexes of Pyrolysis Products of Exhaust Motor-Vehicle and Tractor Tires	33
YATSKO ILYA, MAKSIMOVA NATALYA. The Main Types of Solar Collectors, their Advantages and Disadvantages	39
KLYAUS BOGDAN, VYBORNOV DMITRY, SAVICH DARYA. Analysis of the Heat Potential of the Exhaust Gases Produced by the Refractory Industry	44
PLUZHNIK ANASTASIA, VYBORNOV DMITRY. Thermal Monitoring as a Type of Monitoring of DVT	50
DARIENKO OKSANA. Improvement of Gas Cleaning Processes for Thermal Power Plants from Sulfur Dioxide using Electrodialysis Technology	55
KACHAN VLADIMIR, LUKYANOV ALEXANDER, KONOPATSKIY EVGENIY. Improvement of the Calculation of Convective Part Elements of Heat Training Water Heat Units	62
GNITIEV PAVEL. Investigation of Heat-Exchange Characteristics of Combustion Products During Biogas Combustion	67
UDOVICHENKO ZLATA, MIKHAISKAYA OKSANA, UDOVICHENKO NIKITA. Rationing of Microclimate Parameters	72
NASONKINA NADIY, MARKIN VYACHESLAV, ANTONENKO SVETLANA, ZHUKOV EDUARD, MAROZUKE MARIY, PILIPENKO EKATERINA, BEREZA PAVEL. Strategy of Assessment of Risk and Modernization of Sewer Treatment Facilities	78
TURCHINA GALINA. A Mathematical Approach to Solving Problems of Reliability, with Regard to the Significance of Pipelines in the Ring Systems of Water Supply	88
DAVYDOV ROMAN, MONAKH SVETLANA. Method of Estimation of the Thermal Protection of the Wall of a Building with Ventilated Facades, Taking into Account Longitudinal Air Filtration	94
SHATSKOV ARTEM, VAKULOVICH VALERIA, LYKHACH ALINA. Theoretical Aspects of the use of Low-Temperature Radiant Heating Systems in Residential Buildings	99
GUSENTZOVA YANA, KOVALENKO ALIM, PILAVOV MANOLIS, KOPETC KARINA. The Choice of Controller for the Heat Generating Object	104
OLEKSYUK ANATOLIY, RUSAKOVA ANASTASIA, RUSAKOVA EKATERINA. Heating of Buildings with Heat Carrier from NTPP	110
MONAKH SVETLANA, PANCHENKO LYUDMILA, TSKHVEDIANI ALEXANDRA. Methods for Cleaning and Enriching the Gas Obtained in a Biogas Plant	115
MONAKH SVETLANA, VYBORNOV DMITRY, POPOVICH VITALY. Research of Thermal-Hydraulic Operation Modes of the District Heating System in Zugres	123