

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 2014-5(109)**

**ІНЖЕНЕРНІ СИСТЕМИ  
ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА**

Макіївка 2014

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 2014-5(109)**

**ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ  
И ТЕХНОГЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

Макеевка 2014

### **Засновник і видавець**

Донбаська національна академія будівництва і архітектури

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації КВ № 9643  
видано 02 березня 2005 року Державним комітетом телебачення і радіомовлення України

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.

Друкується за рішенням вченої ради  
Донбаської національної академії будівництва і архітектури  
Протокол № 3 від 29.12.2014

### **Редакційна колегія:**

Горохов Є. В., д. т. н., професор (головний редактор);  
Мущанов В. П., д. т. н., професор (відповідальний редактор);  
Лук'янов О. В., д. т. н., професор (відповідальний редактор випуску);  
Удовиченко З. В., к. т. н., доцент (відповідальний секретар випуску).  
Насонкіна Н. Г., д. т. н., професор;  
Найманов А. Я., д. т. н., професор;  
Сердюк А. І., д. т. н., професор;  
Погребняк В. Г., д. т. н., професор;  
Куліков М. І., д. т. н., професор;  
Соколов В. І., д. т. н., професор;  
Андрійчук М. Д., д. т. н., професор;  
Нездоймінов В. І., д. т. н., доцент.

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

Підписано до друку 13.01.2015 Формат 60х84 1/8. Папір багатофункціональний офісний.  
Друк різнографічний. Умов. друк. арк. 12, 13 Тираж 300 прим. Заказ 024-14

### **Адреса редакції і видавця**

Україна, 86123, Донецька область, м. Макіївка, вул. Державіна, 2,  
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://donnasa.ru/ru/publishing\\_house/vestnik](http://donnasa.ru/ru/publishing_house/vestnik)

Постановою Президії ВАК України від 06.11.2014 р. № 1279 журнал внесено до переліку  
наукових фахових видань із технічних наук та архітектури

Надруковано у поліграфічному центрі ДонНАБА  
86123, Донецька область, м. Макіївка, вул. Державіна, 2

## **Основатель и издатель**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

Свидетельство о государственной регистрации печатного средства массовой информации

КВ № 9643 выдано 2 марта 2005 Государственным комитетом телевидения и радиовещания Украины

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.

Печатается по решению ученого совета

Донбасской национальной академии строительства и архитектуры

Протокол № 3 від 29.12.2014

## **Редакционная коллегия:**

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

Мущанов В. Ф., д. т. н., профессор (ответственный редактор);

Лукьянов А. В., д. т. н., профессор (ответственный редактор выпуска);

Удовиченко З. В., к. т. н., доцент (ответственный секретарь выпуска);

Насонкина Н. Г., д. т. н., профессор;

Найманов А. Я., д. т. н., профессор;

Сердюк А. И., д. т. н., профессор;

Погребняк В. Г., д. т. н., профессор;

Куликов Н. И., д. т. н., профессор;

Соколов В. И., д. т. н., профессор;

Андрійчук М. Д., д. т. н., профессор;

Нездойминов В. И., д. т. н., доцент.

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

Программное обеспечение С. В. Гавенко

Компьютерная верстка Е. А. Солодкова

Подписано в печать 13.01.2015 Формат 60x84 1/8. Бумага многофункциональная офисная.

Печать ризографичная. Услов. печат. лист. 12, 13 Тираж 300 экз. Заказ 024-14

## **Адрес редакции и издателя**

Украина, 86123, Донецкая область, г. Макеевка, ул. Державина, 2,

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://donnasa.ru/ru/publishing\\_house/vestnik](http://donnasa.ru/ru/publishing_house/vestnik)

Постановлением Президиума ВАК Украины от 06.11.2014 г. № 1279 журнал включен в перечень научных профессиональных изданий по техническим наукам и архитектуре

Напечатано в полиграфическом центре ДонНАСА

86123, Донецкая область, г. Макеевка, ул. Державина, 2



УДК 628.1, 519.25

**И. В. САТИН, А. С. ТРЯКИНА**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА КАНАЛА СЕВЕРСКИЙ ДОНЕЦ – ДОНБАСС**

В работе представлено исследование динамики показателей качества воды канала Северский Донец – Донбасс, поступающей на Макеевскую фильтровальную станцию (МФС). На основании анализа суточных данных были определены показатели качества воды (мутность, цветность, аммоний солевой, жесткость, сульфаты, перманганатная окисляемость, ОМЧ и коли-индекс), которые превышают максимально допустимые значения, регламентируемые ДержСанПиН 2.2.4-171-10. Было проведено исследование ряда наблюдений вышеуказанных показателей качества воды за весь рассматриваемый период, по результатам которого был осуществлен расчет статистических показателей распределения. Выявлены особенности превышения максимально допустимых значений.

**водоснабжение, качество воды, показатели качества воды**

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Водоснабжение в Украине в значительной степени обеспечивается поверхностными водами. Основной причиной загрязнения поверхностных вод в наше время является сброс в них неочищенных или недостаточно очищенных хозяйственно-бытовых, промышленных, сельскохозяйственных сточных вод, что приводит к деградации поверхностных вод. Данный фактор увеличивает степень загрязнения воды источников антропогенными загрязнениями, повышая уровень органических соединений, бактериологических показателей, нефтепродуктов, фенолов и т. д. Также в последние годы отмечается снижение водопотребления населением, что приводит к необходимости уменьшения производительности водопроводных очистных сооружений (ВОС). Все это ведет к ухудшению качества питьевой воды систем водоснабжения, так как существующие ВОС не в состоянии справиться с нарастающей нагрузкой по качеству поступающей воды. При разработке существующих технологий очистки на очистных сооружениях в качестве расчетных использовались максимальные значения показателей качества воды, что привело к завышенным затратам при строительстве и эксплуатации сооружений. Таким образом, изучение динамики изменения показателей качества воды в источниках позволит корректировать расчетные показатели систем очистки воды и разработать методы и технические решения для повышения их эффективности.

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

Гидрохимический режим поверхностных источников питьевой воды формируется под влиянием природных факторов в условиях интенсивной хозяйственной деятельности на водосборах. Качество воды в каналах определяется составом и свойствами поступающей в них воды из водоисточников и процессами его трансформации в искусственных водотоках. Формирование качества воды в каждом из водных объектов обусловлено поступлением загрязняющих веществ извне, внутриводоемными процессами самоочищения и биологического самозагрязнения в результате массового развития гидробионтов [1]. Сочетание отдельных природных и антропогенных факторов вызывают суммарные эффекты воздействия и, в значительной степени, изменяющие природный гидрохимический режим водного объекта, что осложняет обоснование технологии очистки воды.

Инженерные методы и технологии использования гидрохимической информации в практике проектирования и эксплуатации водопроводных очистных сооружений недостаточно разработаны и не дают четких рекомендаций обработки, анализа и расчетов исходных данных по водоисточникам. В Украине детально не рассматривался вопрос определения расчетных показателей, которые используются для подбора технологической схемы очистки воды для питьевых целей. В России этим вопросом занимаются Говорова Ж. М. и Родина А. О. [2, 3]. Учитывая, что до настоящего времени технологические схемы водоподготовки назначаются по максимальным значениям показателей качества воды, что в ряде случаев приводит к удорожанию проектов. Для снижения затрат при проектировании и строительстве требуется научно обоснованное снижение максимальных значений расчетных концентраций ингредиентов при одновременном сохранении санитарно-гигиенической надежности проектируемых сооружений.

**Целью** предложенной работы является анализ гидрохимических наблюдений показателей качества воды канала Северский Донец – Донбасс, которая поступает на МФС.

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

На основе данных технологического контроля за показателями качества воды канала Северский Донец – Донбасс, поступающей на Макеевскую фильтровальную станцию (МФС), выполнен анализ гидрохимического режима водоисточника.

На МФС контролируются следующие показатели качества исходной воды: мутность, запах, цветность, рН, температура, аммоний солевой, нитриты ионы, нитраты ионы, железо общее, щелочность, хлориды, сульфаты, перманганатная окисляемость, фосфаты, сухой остаток, взвешенные вещества, фтор, кальций, магний, бикарбонаты, натрий, калий, БПК, растворенный кислород, двуокись углерода, марганец, кремнекислота, ПАВ, нефтепродукты, фенолы, ХПК, ОМЧ, коли-индекс. Были проанализированы данные по показателям качества поступающей на МФС воды: суточные за 2004–2011 годы, среднемесячные за 2001–2011 годы. В результате предварительного анализа этих данных было определено, что максимально допустимые значения, регламентируемые ДержСанПиН 2.2.4 171 10, превышают следующие показатели качества воды: мутность, цветность, аммоний солевой, сульфаты, жесткость, перманганатная окисляемость, нефтепродукты, фенолы, ОМЧ, коли индекс.

Основными показателями качества исходной воды, по которым предварительно назначается технологическая схема очистки, являются мутность и цветность (рис. 1, 2). Данные параметры определяются в лаборатории МФС два раза в сутки. В результате анализа ряда наблюдений по показателю мутность можно сделать вывод, что вода канала Северский Донец – Донбасс относится к маломутным водам [4]. На графике (рис. 1) четко прослеживается повторяемость по годам и сезонам года, наиболее максимальное значение мутности наблюдается в период весна-лето 2007 года. Практически весь рассматриваемый период показатель мутности превышает максимально допустимое значение [5]. Что касается цветности, то практически весь период наблюдения вода канала соответствовала воде с малой цветностью [4]. Только лишь в марте 2010 года отмечается резкое и кратковременное повышение цветности до значения 48 градусов, что соответствует воде со средней цветностью [4]. Показатель цветности превышает максимально допустимое значение [5] из года в год во время паводка (март – апрель) и в летнюю межень (май – октябрь).

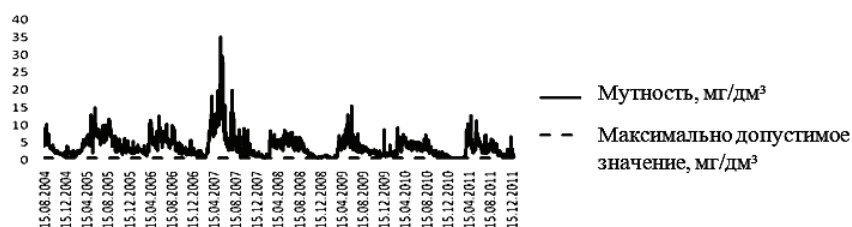


Рисунок 1 – Ряд наблюдений по показателю мутность.

Далее рассматривался аммоний солевой (рис. 3), содержание которого в исходной воде определяется в лаборатории МФС один раз в сутки. Наличие аммонийных соединений в воде чаще всего обусловливается загрязнением ее неочищенными или недостаточно очищенными сточными водами. Максимально допустимое значение [5] показатель аммоний солевой превышает всего два раза за рассматриваемый период. Начиная с 2007 года прослеживается повторяемость по годам и сезонам года с максимумами в январе-феврале.



Рисунок 2 – Ряд наблюдений по показателю цветность.

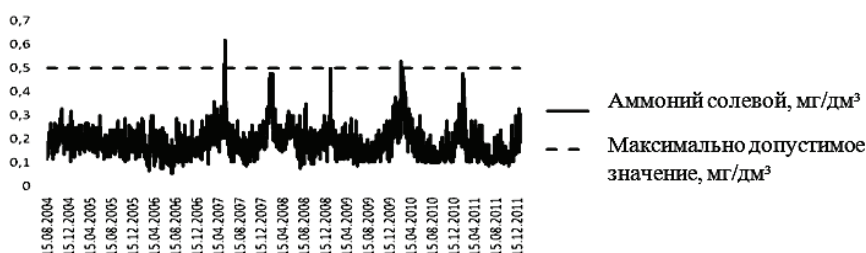


Рисунок 3 – Ряд наблюдений по показателю аммоний солевой.

Жесткость и содержание сульфатов характеризуют солевой состав воды (рис. 4, 5). Жесткость исходной воды определяют в лаборатории МФС один раз в сутки, содержание сульфатов определяется один раз в неделю. На графике (рис. 4) отчетливо видна повторяемость значений жесткости по годам и месяцам года. Обычно максимальное значение жесткости воды можно наблюдать в зимний период (январь – март). Во время весеннего паводка наблюдается резкое падение жесткости воды. Летом и осенью жесткость воды постоянно возрастает и достигает максимума к зиме. Практически половину рассматриваемого периода жесткость превышает максимально допустимое значение [5].

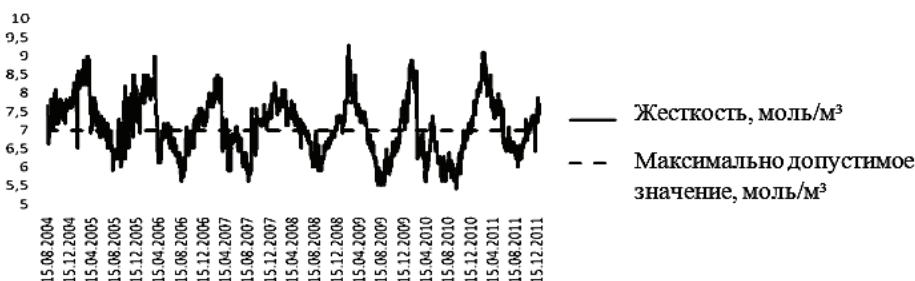


Рисунок 4 – Ряд наблюдений по показателю жесткость.

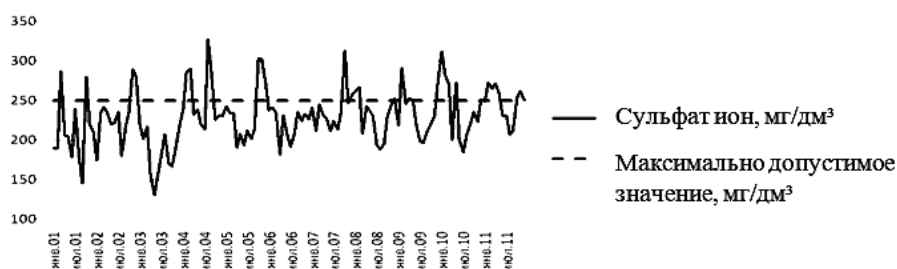


Рисунок 5 – Ряд наблюдений по показателю сульфат ион.

Перманганатная окисляемость характеризует наличие органических веществ в воде как естественного происхождения, так и антропогенного. Показатель перманганатной окисляемости исходной воды определяется в лаборатории МФС ежедневно (рис. 6). Максимальные значения перманганатной окисляемости наблюдаются в период паводка (март – апрель). Практически на протяжении всего периода наблюдения перманганатная окисляемость превышает максимально допустимое значение [5].



Рисунок 6 – Ряд наблюдений по показателю перманганатная окисляемость.

Перманганатная окисляемость характеризует наличие органических веществ в воде как естественного происхождения, так и антропогенного. Показатель перманганатной окисляемости исходной воды определяется в лаборатории МФС ежедневно (рис. 6). Максимальные значения перманганатной окисляемости наблюдаются в период паводка (март – апрель). Практически на протяжении всего периода наблюдения перманганатная окисляемость превышает максимально допустимое значение [5].

Общая бактериальная загрязненность воды характеризуется показателем – общее микробное число (ОМЧ), то есть количество бактерий в 1 см<sup>3</sup> воды (рис. 7). Также особую важность для санитарной оценки воды имеет определение коли-индекса, то есть наличие бактерий группы кишечной палочки (рис. 8). Оба этих показателя качества исходной воды определяются в лаборатории МФС ежедневно. На графиках четко прослеживается повторяемость по годам и сезонам года, максимумы показателей приходятся на летнюю межень (май – октябрь). Показатель ОМЧ практически на протяжении всего рассматриваемого периода превышает максимально допустимое значение [5]. А показатель коли-индекса постоянно превышает максимально допустимое значение [5], так как регламентируется полное отсутствие кишечных палочек в питьевой воде.

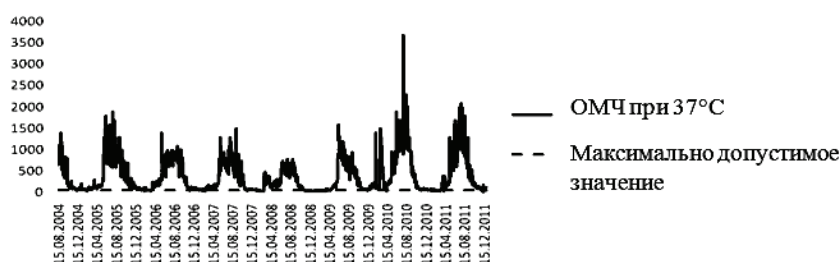


Рисунок 7 – Ряд наблюдений по показателю ОМЧ.

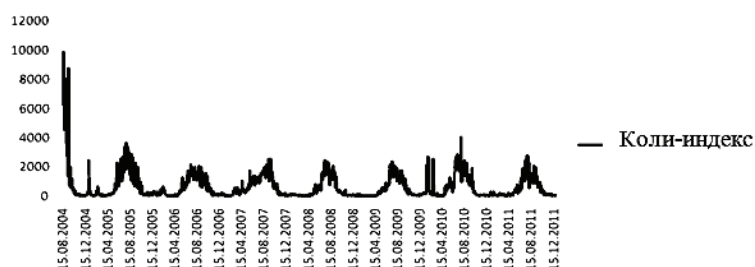


Рисунок 8 – Ряд наблюдений по показателю коли-индекс.

Максимально допустимые значения за рассматриваемый промежуток времени [5] также превысили показатели нефтепродуктов и фенолов (рис. 9, 10). Данные вещества являются антропогенными загрязнениями и обладают кумулятивными свойствами, поэтому могут в значительной мере изменять гидрохимический режим источника водоснабжения. На графиках видно, что данные показатели не имеют никакой закономерности распределения по годам и месяцам, так как они возникают в результате сбросов промышленных сточных вод.

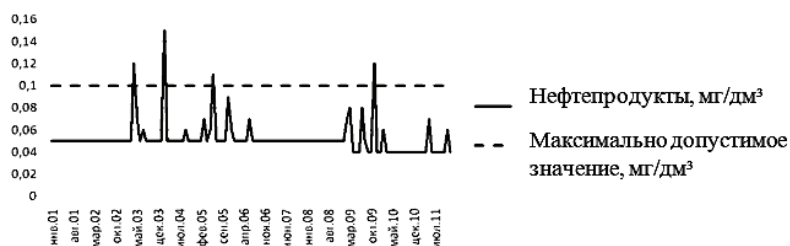


Рисунок 9 – Ряд наблюдений по показателю нефтепродукты.

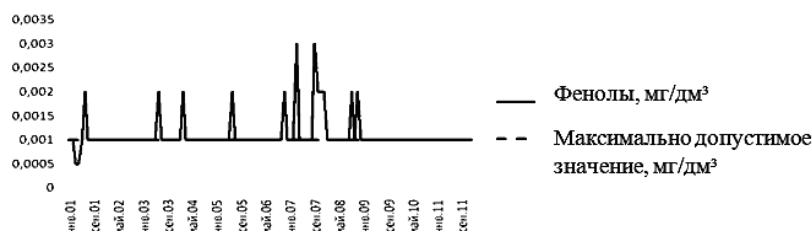


Рисунок 10 – Ряд наблюдений по показателю фенолы.

Далее статистической оценке подверглись все вышеперечисленные показатели качества воды, за исключением аммония солевого, нефтепродуктов и фенолов. Это связано с тем, что превышение данными показателями максимально допустимых значений не является значительным, а также данных загрязнений возможно избежать, усилив экологический контроль за сбросами в источники и ужесточив мероприятия по экологической безопасности.

В таблице приведены результаты статистической обработки показателей качества воды, поступающей на МФС. Были рассчитаны: мода, среднее значение, стандартное отклонение, асимметрия, эксцесс, нижняя и верхняя граница 95%-ного доверительного интервала, минимум и максимум.

Таблица – Результаты статистической обработки

Величина	Максимально допустимое значение [5]	Мода	Среднее значение	Стандартное отклонение	Асимметрия	Эксцесс	Нижняя граница 95 % доверительного интервала	Верхняя граница 95 % доверительного интервала	Минимум	Максимум
Цветность, град	20	16	16,68	3,36	1,71	7,7	16,59	16,77	5	48
Мутность, мг/дм³	0,58	0,58	3,92	3,29	2,52	11,02	3,83	4,0	0,47	35,37
Сульфат ион, мг/дм³	250	–	228,8	37,9	–0,01	0,87	222,4	235,3	101	327,5
Жесткость, моль/дм³	7	6,7	7,09	0,76	0,18	–0,55	7,07	7,11	5,4	9,3
Окисляемость, мг/дм³	5	6	6,16	0,73	0,96	2,79	6,14	6,18	4,0	9,9
ЗМЧ при 37 °С	50	110	378	411	1,59	3,1	367	389	11	3 700
Колиндекс	0	59	656	922	3,31	18,26	631	680	19	9 900

## ВЫВОДЫ

Проведя анализ сезонной динамики показателей качества воды, можно отметить, что по мутности, цветности, жесткости и бактериологическим показателям отмечен естественный гидрохимический режим. Также можно сказать об антропогенном загрязнении воды канала по данным показателей аммония солевого, перманганатной окисляемости, нефтепродуктов, фенолов. Это может быть вызвано их эмиссиями с водосбора от сельских населенных пунктов, объектов животноводства, промышленных объектов (особенно в паводковые периоды), которые, накладываясь на естественный гидрохимический режим показателя, изменяют его внутригодовое распределение.

В настоящее время для обоснования технологий очистки воды в значительной степени необходима разработка методов для комплексной оценки гидрохимического режима источников водоснабжения. Вследствие отсутствия необходимой информации по качеству исходной воды при проектировании очистных сооружений из источников питьевого назначения, особенно подверженных антропогенной нагрузке, значительно возрастают затраты на строительство и эксплуатацию сооружений из-за необходимости необоснованного применения дорогостоящих сооружений и технологий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журба, М. Г. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений [Текст]. В 3 т. Т. 2. Очистка и кондиционирование природных вод / М. Г. Журба, Л. И. Соколов, Ж. М. Говорова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Ассоциации строительных ВУЗОВ, 2004. – 493 с.
2. Говорова, Ж. М. Обоснование и разработка технологий очистки природных вод, содержащих антропогенные примеси [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.04 / Говорова Жанна Михайловна. – Москва, 2004. – 389 с.
3. Родина, А. О. Обоснование показателей качества поверхностных вод при выборе водоочистных технологий с применением теории риска [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04 / Родина Алла Олеговна. – Вологда, 2005. – 153 с.
4. ДБН В.2.5-74:2013. Державні будівельні норми. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування [Текст]. – Уведено вперше (втрачає чинності на території України СНиП 2.04.02-84; чинні від 2014-01-01. – К.: Мінрегіон України, 2013. – 172 с.
5. ДСанПіН 2.2.4-171-10. Державні санітарні норми та правила. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною [Текст]: затверджено Наказом Міністерства охорони здоров'я України № 400 від 12.05.2010 // Офіційний вісник України. – 2010. – № 51. – С. 99–129.

Получено 02.09.2014

І. В. САТИН, А. С. ТРЯКИНА

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОХІМІЧНОГО РЕЖИМУ КАНАЛУ СІВЕРСЬКИЙ  
ДОНЕЦЬ – ДОНБАС

Донбаська національна академія будівництва і архітектури

В роботі представлено дослідження динаміки показників якості води каналу Сіверський Донець – Донбас, яка надходить на Макіївську фільтрувальну станцію (МФС). На основі аналізу добових даних були визначені показники якості води (каламутність, кольоровість, амоній сольовий, жорсткість, сульфати, перманганатна окиснюваність, ЗМЧ та колі-індекс), що перевищують максимально допустимі значення, які регламентують ДержСанПіН 2.2.4-171-10. Було проведено дослідження ряду спостережень вищевказаних показників якості води за весь період, що розглядається, за результатами якого виконано розрахунок статистичних показників розподілу. Виявлено особливості перевищення максимально допустимих значень.

**водопостачання, якість води, показники якості води**

IGOR SATIN, ALONA TRIAKINA

THE INVESTIGATION OF HYDRO CHEMICAL REGIME OF CHANNEL  
SEVERSKY DONETS – DONBAS

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

This paper examines the dynamics of the water quality of the channel of the Seversky Donets – Donbas which supplied to the filter station of Makeevka (MFS). Based on the analysis of daily data the indicators of water quality (turbidity, chromaticity, ammonium salt, stiffness, sulfate, permanganate oxidation, total bacterial count and coli-index), which exceed the maximum allowable values which regulated State Sanitary

Rules and Norms 2.2.4-171-10, have been determined. The study of series of observations of the above indicators of water quality for the entire period under review has been done, calculation of statistical parameters of the distribution have been carried out based on research results. Have been identified the features of exceeding the maximum allowable values have been identified.

**water supply, water quality, water quality indicators**

**Сатін Ігор Валентинович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри міського будівництва і господарства Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: очистка природних вод.

**Трякіна Альона Сергіївна** – магістр, асистент кафедри міського будівництва і господарства Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: очистка природних вод.

**Сатин Игорь Валентинович** – кандидат технических наук, доцент кафедры городского строительства и хозяйства Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: очистка природных вод.

**Трякина Алена Сергеевна** – магистр, ассистент кафедры городского строительства и хозяйства Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: очистка природных вод.

**Satin Igor** – PhD (Eng.), Assistant Professor, Municipal Building and Economy Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: purification of natural water.

**Tryakina Alona** – master degree, Assistant, Municipal Building and Economy Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: purification of natural water.



УДК 628.16.087:620.19+628.162.4

**С. Е. АНТОНЕНКО**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ ПАРОВЫХ И ЖАРОГАЗОТРУБНЫХ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ВОДОПОДГОТОВКОЙ**

Рассмотрены возможности использования промышленных электролизеров при электрохимическом умягчении подпиточной воды для паровых и жарогазотрубных котлов малой мощности. Приведены особенности конструкции, схемы электролизеров, даны их технические характеристики и границы применимости.

**электрохимическое умягчение, электролизер**

Использование электрохимического умягчения подпиточной воды для котлов малой мощности позволяет полностью отказаться от традиционного двухступенчатого натрийкатионирования [1–8]. При эксплуатации же котла без водоподготовки толщина накипи 0,5 мм достигается за срок 30 суток, после этого должна производиться химическая промывка котла с целью удаления отложений. Работа котла в течение 1 года без водоподготовки полностью выводит его из строя. При использовании электрохимически умягченной подпиточной воды срок эксплуатации до химической промывки увеличивается не меньше чем до 1 года. Электрохимическая водоподготовка рекомендуется к использованию вместо натрийкатионирования в паровых котельных небольшой мощности (до 1–2 т/ч пара). Она обеспечивает практически безнакипный режим работы котла не менее 1 года. При этом снижаются эксплуатационные затраты, отсутствуют вредные солевые стоки от водоподготовки, нет необходимости использования реагентов и устройства их складов.

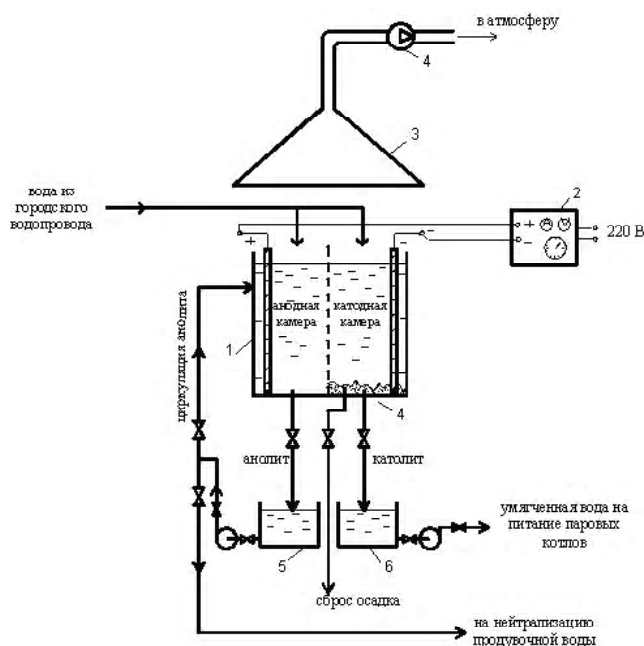
### *Особенности конструкции промышленного электролизера*

В котельной вместо натрийкатионитных фильтров используется установка электрохимического умягчения с диафрагменным электролизером. В электролизер подается вода из городского водопровода. На электроды подается постоянный ток от выпрямителя  $U \leq 12$  В. Умягченная вода из катодной камеры (католит) направляется в бак питательной воды паровых котлов. Вода из анодной камеры (анолит) постоянно циркулирует через промежуточный бак. Часть анолита используется для нейтрализации продувочной воды котлов. Убыль анолита пополняется свежей водой из водопровода. Осадок карбоната кальция и гидроксида магния из катодной камеры сбрасывается в канализацию. Этот осадок не представляет экологической опасности, поскольку является практически нерастворимым в воде. Схема установки электрохимического умягчения производительностью 1 м<sup>3</sup>/ч приведена на рис. 1. Для отвода выделяющихся при электролизе газов предусматривается местный отсос в виде зонта и вентилятора.

Диафрагменный электролизер может быть двух разновидностей – периодического действия (непроточный) и непрерывного действия (проточный). Оба вида выполняются в виде бака из листовой углеродистой стали с толщиной стенок 2–3 мм, изнутри бак футерован пластиком (винипластом или полиэтиленом). Внутренние перегородки выполнены из пластика. Схема электролизера периодического действия приведена на рис. 2. Ширина и высота электролизера изнутри по 1 050 мм. Состоит он из 20 анодных и 20 катодных камер. Общий объем катодных камер составляет 1 м<sup>3</sup>, а общая длина – 3 080 мм. В каждой анодной камере установлены по 4 графитовых анода для хлорной промышленности (ТУ 48-20-86-81) размером 1 100×250×50 мм, итого 80 анодов общей площадью 20 м<sup>2</sup>. В

© С. Е. Антоненко, 2014





**Рисунок 1** – Схема установки электрохимического умягчения: 1 – диафрагменный электролизер; 2 – блок питания постоянным током (выпрямитель); 3 – зонт для отвода выделяющихся газов; 4 – вентиль; 5 – бак-анолита; 6 – бак умягченной воды (католита) для питания паровых котлов.

катодной камере установлены катоды из листовой углеродистой стали толщиной 2–3 мм, размер 1 000×1 100 мм, общая активная площадь 20 м<sup>2</sup>. на электролизер может подаваться постоянный ток силой до 300 А (при графитовых анодах). При использовании других анодов, например – окисноруденийтитановых (ОРТА), количество камер может быть уменьшено до 3, соответственно длина электролизера уменьшится до 0,35 м. Ток и производительность остаются такими же – 300 А и 1 м<sup>3</sup>/ч.

Диафрагмы устраиваются из брезента или бельтинга. Продолжительность электролиза – 1 час. Затем из камер вода сливается в баки 5 и 6, катодная камера для нового цикла наполняется из водопровода, а анодная – из бака 5.

В проточном электролизере (рис. 3) вода из городского водопровода поступает в первую камеру и последовательно проходит все камеры с помощью перепускных патрубков. Анолит в таком электролизере непрерывно циркулирует через электролизер и бак анолита с помощью насоса. Преимуществом проточного электролизера является большая простота эксплуатации и несколько более высокий эффект умягчения. Основная часть накипеобразующих солей выпадает в первых камерах и осадок из них сбрасывается чаще.

Напряжение на электродах обычно составляет 3–5 В, потребляемая мощность до 1,5 кВт. Распределение тока между электродами производится с помощью электрических медных многожильных кабелей.

#### *Границы применимости*

Эффективность работы установки гарантируется при следующих параметрах системы:

- температура воды – не более 130 °С,
- общая жесткость воды – до 20 мг-экв/л,
- карбонатная жесткость – до 10 мг-экв/л,
- солеосодержание воды – не менее 150–200 мг/л,
- взвешенные вещества – до 50 мг/л,
- производительность котельной по пару – до 2 т/ч.

#### *Рекомендации по конструктивной схеме установки электрохимического умягчения*

Установка электрохимического умягчения воды представляет собой – диафрагменный электролизер, в котором подпиточная вода, подаваемая в котел, проходит обработку постоянным электрическим

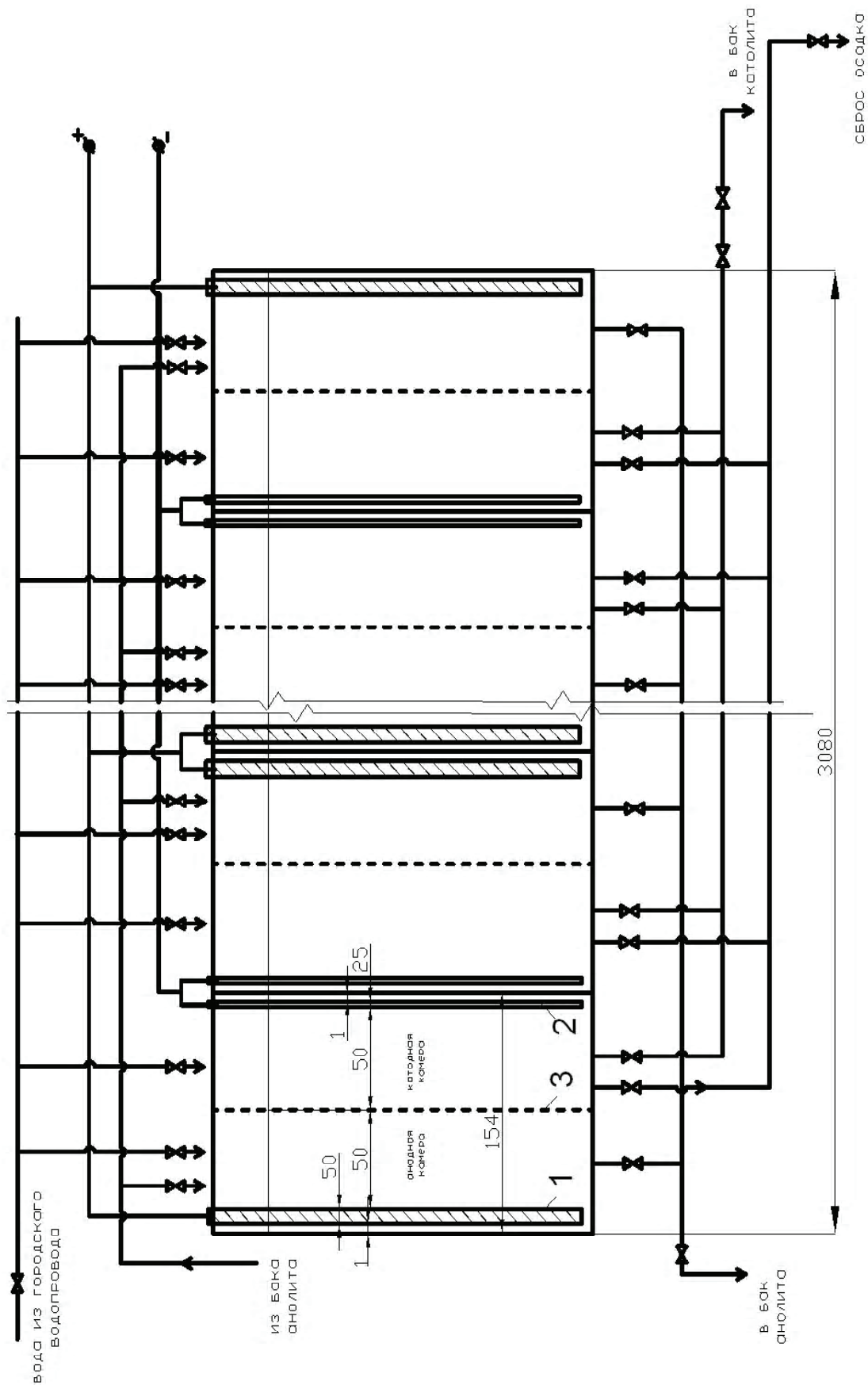


Рисунок 2 – Схема электролизера периодического действия производительностью 1 м³/ч (20 камер): 1 – анод; 2 – катод; 3 – диафрагма.

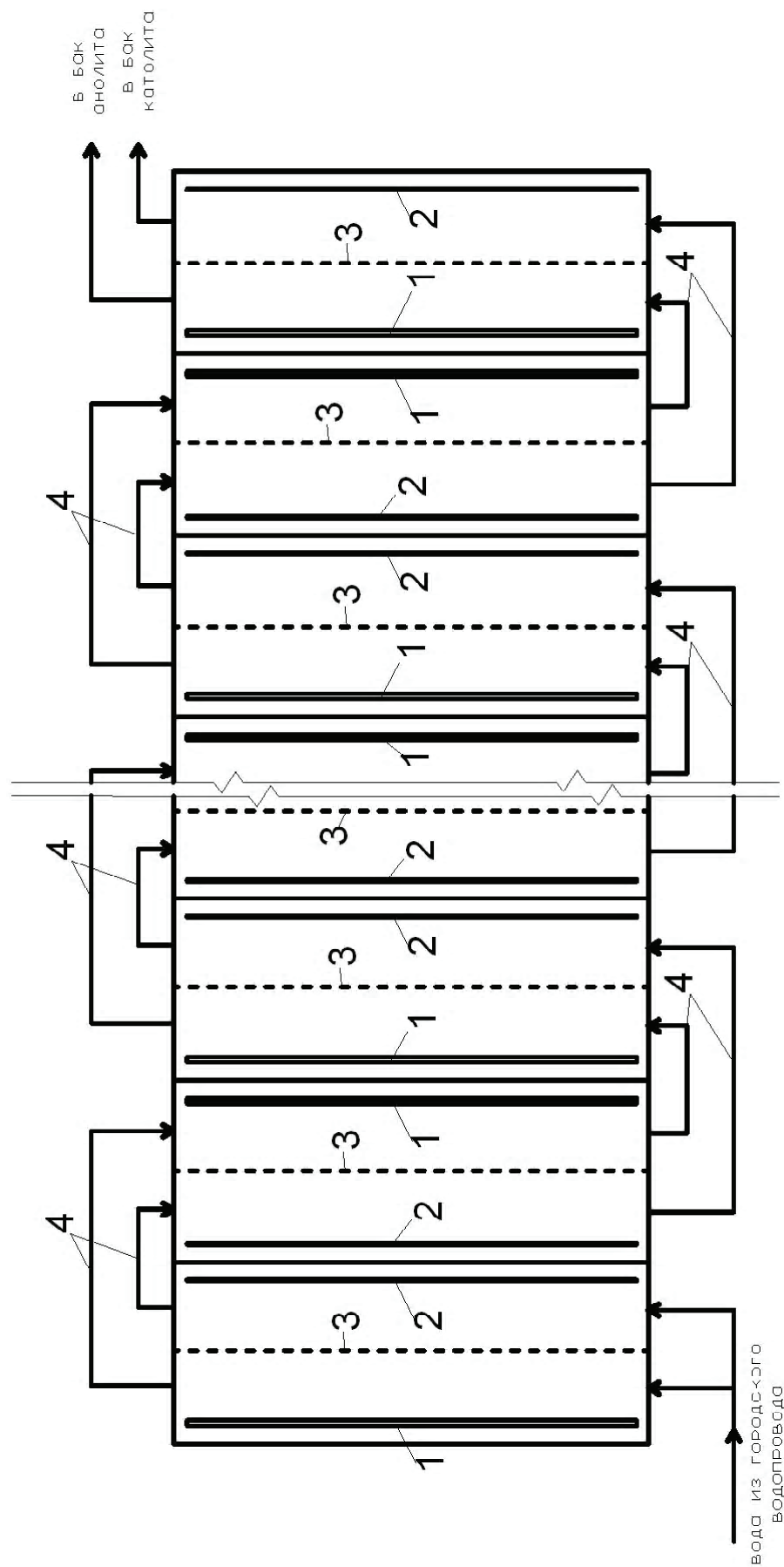


Рисунок 3 – Схема проточного электролизера: 1 – анод; 2 – катод; 3 – диафрагма; 4 – перепусковой патрубок.

током, при этом на катоде происходит образование рыхлого слоя отложений накипеобразующих солей. Кроме этого, электрическое поле стимулирует образование зародышей кристаллизации, благодаря чему накипь выделяется в основном в объеме воды, а не на поверхностях нагрева, что усиливает антинакипный эффект.

Корпус электролизера изготавливается из любой нетокопроводящей пластмассы, диафрагма из бейтинга или брезента (использование ионообменных мембран повышает эффективность установки, но существенно увеличивает капитальные затраты). Электродная система состоит из чередующихся катодов и анодов, расстояние между которыми принимается 10 см. Площадь электродов и размеры емкости зависят от производительности аппарата и показателей качества воды. Напряжение на электродах не превышает 12 В. Источником постоянного тока могут быть катодные сетевые станции типа КСС-600, КСС-1200, АРТЗ, КСГ, ТЕР или выпрямители типа ВАК, ВСА, ВАКР и т. п.

В качестве катода рекомендуется использование углеродистой стали, нержавеющей стали или титана.

В качестве анода возможно использовать:

- графитовые аноды в виде плит размером 250×50×700 (1 100) мм. Срок службы 16–20 мес. Допустимая плотность тока не более 10–15 А/м<sup>2</sup>,
- платинированный титан (ПТА). Допустимая плотность тока до 1 000 А/м<sup>2</sup>,
- окиснорутенийтитановые аноды (ОРТА). Плотность тока более 100 А/м<sup>2</sup>,
- ферросилидовые аноды (кремнистый чугун). Допустимая плотность тока до 150 А/м<sup>2</sup>.

После обработки электрическим током вода разделяется на католитную и анолитную фракции. Католит подается на подпитку котла, анолитная фаза возвращается в электролизер после смешения с водопроводной водой.

#### *Технические характеристики*

Примерные характеристики установки электрохимического умягчения производительностью 1 м<sup>3</sup>/ч при использовании исходной воды с карбонатной жесткостью до 10 мг-экв/л:

- сила тока – до 300 А,
- напряжение на электродах – до 12 В (обычно 3–5 В),
- потребляемая мощность – до 1,5 кВт,
- расход электроэнергии – ~ 0,22 кВт·ч/г-экв,
- объем электролизера – 2 м<sup>3</sup>,
- производительность установки – 1 м<sup>3</sup>/ч,
- площадь электродов (анодов и катодов) – по 20 м<sup>2</sup> (при использовании графитовых анодов).

Выход по току  $B_t$  определяем по формуле [9]:

$$B_t = 26,8 \cdot (c_0 - c_t) \cdot V_p / (I \cdot t_a),$$

где  $c_0, c_t$  – концентрация накипеобразователей до и после электрообработки (мг-экв/л),  
 $V_p$  – объем установки (м<sup>3</sup>),  
 $I$  – сила тока (А),  
 $t_a$  – время электрообработки (час).

$$B_t = 26,8 \cdot (10-4) \cdot 2 / (90 \cdot 10^{-3} \cdot 1) = 0,82.$$

Периодически, один раз в смену, из аппаратов через дренажную задвижку осуществляется сброс воды (продувка) в течение 1–2 мин, одновременно сбрасывается осадок из камер.

Периодически один раз в месяц, а также по необходимости, установка останавливается для очистки электродов от накипи. Очистка осуществляется вручную скребком с последующей промывкой электродов водой.

Вентиляция помещения должна быть принудительной и обеспечивать 6-кратный воздухообмен.

Обслуживание установки осуществляется персоналом котельной, дополнительных штатных единиц не требуется.

#### **ВЫВОД**

Использование промышленных электролизеров по предложенным схемам для умягчения подпиточной воды паровых котлов и жарогазотрубных теплогенераторов позволяет снизить капитальные и эксплуатационные затраты, при этом существенно увеличивается срок службы котлов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Найманов, А. Я. О применимости противонакипной электрообработки в водоподготовке паровых котлов [Текст] / А. Я. Найманов, С. Е. Антоненко // Вісник Донбаської державної академії будівництва. – 2000. – Вип. 2000-3(23): Інженерні системи та техногенна безпека. – С. 122–123.
2. Найманов, А. Я. Электрохимическое умягчение воды [Текст] / А. Я. Найманов, С. Е. Антоненко, С. В. Островская // Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури. – 2001. – Вип. 2001-2(27): Інженерні системи та техногенна безпека. – С. 110–113.
3. Найманов, А. Я. Прогрессивный метод снижения накипеобразования [Текст] / А. Я. Найманов, А. А. Найманова, С. Е. Антоненко // Проблемы экологии: Общегосударственный научно-технический журнал. – Донецк: ДонНТУ, 2001. – № 1'2001. – С. 17–21.
4. Антоненко, С. Е. Снижение накипеобразования в паровых котлах [Текст] / С. Е. Антоненко // Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури. – 2003. – Вип. 2003-4 (41): Інженерні системи та техногенна безпека. – С. 18–22.
5. Найманов, А. Я. Подпитка газовых котлов электрохимически умягченной водой [Текст] / А. Я. Найманов, С. Е. Антоненко // 36. наук. праць Луганського національного аграрного університету «Технічні науки (будівництво)». – Луганськ: ЛНАУ, 2004. – № 32(44). – С. 63–68.
6. Найманов, А. Я. Электрохимическая технология водоподготовки для паровых котлов [Текст] / А. Я. Найманов, Н. И. Зотов, С. Е. Антоненко // Коммунальное хозяйство городов / Харьковская национальная академия городского хозяйства. – К.: «Техніка», 2004. – Вип. 58 – С. 89–94.
7. Антоненко, С. Е. Безреагентная технология водоподготовки для паровых котлов [Текст] / С. Е. Антоненко // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2005. – Вип. 2005-2(50): Інженерні системи та техногенна безпека. – С. 28–33.
8. Лукьянов, А. Исследование водно-химического режима прямоточного парового котла при подпитке водой, прошедшей электрохимическую водоподготовку [Текст] / А. Лукьянов, А. Найманов, С. Антоненко // MOTROL. – Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences. – Lublin, 2013. – Vol. 15, No. 6. – P. 117–124.
9. Яковлев, С. В. Технология электрохимической очистки воды [Текст] / С. В. Яковлев, И. Г. Краснобородько, В. М. Рогов. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. – 312 с.

Получено 03.09.2014

С. Є. АНТОНЕНКО

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ ПАРОВИХ І  
ЖАРОГАЗОТРУБНИХ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРІВ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ З  
ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЮ ВОДОПІДГОТОВКОЮ  
Донбаська національна академія будівництва і архітектури

Розглянуто можливості використання промислових електролізерів при електрохімічному зм'якшенні підживлювальної води для парових і жарогазотрубних котлів малої потужності. Наведені особливості конструкції, схеми електролізерів, їхні технічні характеристики та границі застосовності.  
**електрохімічне зм'якшення, електролізер**

SVETLANA ANTONENKO

PRACTICAL REALIZATION OF RESULTS OF THE WORK STEAM AND FIRE-  
GAS-TUBE HEAT GENERATORS OF LOW POWER WITH  
ELECTROCHEMICAL WATER TREATMENT  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

The possibilities of using industrial electrolyzers for electrochemical softening of make-up water for steam and fire-gas-tube boilers of low power have been considered. The features of the design, scheme of electrolyzers have been given, their technical characteristics and the limits of applicability have been also given.  
**electrochemical softening, electrolyzer**

**Антоненко Світлана Євгенівна** – кандидат технічних наук, асистент кафедри міського будівництва та господарства Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: електрохімічне зм'якшення води, нові матеріали і устаткування при проектуванні систем опалення.

**Антоненко Светлана Евгеньевна** – кандидат технических наук, ассистент кафедры городского строительства и хозяйства Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: электрохимическое умягчение воды, новые материалы и оборудование при проектировании систем отопления.

**Antonenko Svetlana** – PhD in Engineering, Assistant, Municipal Building and Economy Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: electrochemical softening waters, new materials and the equipment at designing of systems of heating.

УДК 628.33

**Н. П. ОМЕЛЬЧЕНКО <sup>а</sup>, Л. И. КОВАЛЕНКО <sup>б</sup>**

<sup>а</sup> Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, <sup>б</sup> Донецкий национальный технический университет

## **КОНТАКТНЫЕ КАМЕРЫ ХЛОПЬЕОБРАЗОВАНИЯ С ВОЛОКНИСТОЙ НАСАДКОЙ**

Рассмотрено предложение по использованию волокнистой насадки из синтетических волокон в качестве контактной среды для процесса хлопьеобразования при осветлении мутных природных вод поверхностных водоисточников отстаиванием. Внедрение новой технологии позволяет получать качественные хлопья при низких температурах и щелочности воды, предотвращает заиливание контактных камер хлопьеобразования и отличается низким гидравлическим сопротивлением даже в заиленном состоянии. Проведены исследования процесса хлопьеобразования в волокнистой контактной среде, определены оптимальные параметры процесса.

**обработка воды коагулянтами, контактная коагуляция, камера хлопьеобразования, волокнистая насадка, синтетическое волокно**

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

В практике подготовки питьевой воды из поверхностных источников в реагентных схемах обработки широкое применение нашли камеры хлопьеобразования объемного типа. Они используют принцип объемной коагуляции: при перемешивании воды с убывающим градиентом скорости микрохлопья из смесительных устройств укрупняются вследствие слипания в макрохлопья. Последние выносятся потоком воды в отстойники (горизонтальные, вертикальные или наклонные) и выпадают в них в осадок.

Процесс объемной коагуляции имеет ряд существенных недостатков. Его протекание зависит от щелочности и температуры воды – при низких значениях этих показателей хлопьеобразование тормозится, образуются рыхлые мелкие хлопья, выносимые из отстойников и увеличивающих грязевую нагрузку на скорые фильтры. Аналогичные проблемы возникают при очистке маломутных цветных вод. В частности, такая ситуация имеет место в зимнее время года, когда оба фактора достигают минимальных значений. Кроме того, объемные камеры хлопьеобразования – громоздкие сооружения, требующие значительных капитальных затрат.

Этих недостатков в значительной степени лишены контактные камеры хлопьеобразования, использующие принцип контактной коагуляции. При этом коллоидные частицы коагулянта и грубодисперсные примеси воды прилипают к твердым поверхностям контактной среды, накапливаются в порах, а затем выносятся в виде крупных агрегатов в отстойники и осаждаются. Такой процесс протекает при низких температурах воды, не требует щелочного резерва, требует меньших доз коагулянта. В отличие от объемной коагуляции, требующей для образования крупных хлопьев длительного времени (от 5 до 30 минут), контактная коагуляция протекает мгновенно, поэтому контактные камеры хлопьеобразования имеют существенно меньший строительный объем по сравнению с объемными камерами реакции.

Однако конструктивное решение традиционных контактных камер хлопьеобразования в виде щебеночно-гравийной загрузки имеет недостаток, связанный с заиливанием пор, увеличением гидравлического сопротивления загрузки и необходимостью периодической трудоемкой операции по очистке при загрузке. Вследствие этого недостатка такие камеры не нашли широкого применения на практике.

## АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

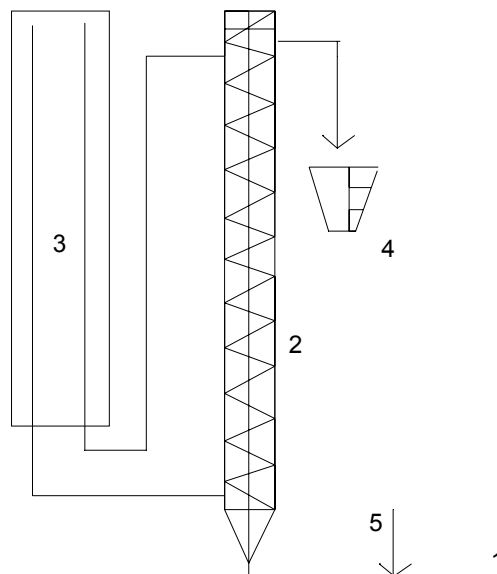
Нашими предшествующими исследованиями накоплен опыт использования синтетических волокон в форме ершей как фильтрующей среды для осветления природных и шахтных вод [1, 2, 3]. Особенности волокнистой среды являются высокая удельная поверхность (суммарная площадь поверхностей всех волокон в единице объема насадки достигает величины  $300...600 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ) и высокая пористость, достигающая величины, превышающей 99 % (в гравийных камерах – до 35 %) [4]. Вследствие высокой пористости среды ее гидравлическое сопротивление даже в заиленном состоянии на 2...3 порядка меньше по сравнению с сопротивлением гравийной среды. В исследованиях получены результаты, свидетельствующие о высокой эффективности инновационной технологии. В указанных работах приведены рекомендации по устройству волокнистой фильтрующей среды из синтетических волокон в форме ершей. Подобные результаты получены зарубежными исследователями [5].

## ЦЕЛИ

Требуется доказать возможность получения крупных и прочных хлопьев после обработки воды коагулянтами в волокнистой контактной среде для последующего ее осветления в отстойниках.

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Были проведены исследования по изучению волокнистой камеры хлопьеобразования в лабораторных условиях на пилотной установке, представленной на рис. 1.



**Рисунок 1** – Пилотная установка с волокнистой насадкой: 1 – подвод исходной воды; 2 – колонка с волокнистым ершом; 3 – пьезометрический щит; 4 – мерный сосуд; 5 – ввод раствора коагулянта.

Основным элементом установки являлась прозрачная колонка круглого сечения из оргстекла 2 внутренним диаметром 50 мм и длиной 1,4 м с двумя прободборниками для сообщения с пьезометрическими трубками. По центру колонки натянут синтетический ерш из полиэфирных (лавсановых) волокон диаметром 50 мм (то есть ерш занимает все сечение воронки). Исходная вода подавалась на колонку из водопровода. Ввод раствора коагулянта производился через воронку (на схеме не показана), куда раствор поступал через трубку с регулирующим зажимом от сосуда Мариотта. Измерение расхода воды производилось с помощью мерной кружки 4.

Скорость фильтрования определялась делением расхода воды через колонку на площадь ее сечения. Расход воды устанавливался объемным способом с помощью мерного сосуда и секундомера. Ввод раствора коагулянта производился через воронку (на схеме не показана), куда раствор поступал через трубку с регулирующим зажимом от сосуда Мариотта. В качестве коагулянта исследовался неочищенный сернокислый глинозем концентрацией 0,5...1,0 %. Доза коагулянта величиной  $30 \text{ мг/дм}^3$  в опыте поддерживалась постоянной.



В течение фильтроцикла через каждые 0,5 часа отбирались пробы фильтрата, фиксировалась величина потерь напора в насадке и корректировались скорости фильтрования и расход коагулянта.

В пробах фильтрата отмечался момент поступления взвешенных веществ – частиц гидроксида алюминия, выносимых из колонки. В опытах концентрация взвесей определялась на фотоэлектрориметре. Фильтрат с гидроксидом алюминия подвергался седиментационному анализу на торзионных весах.

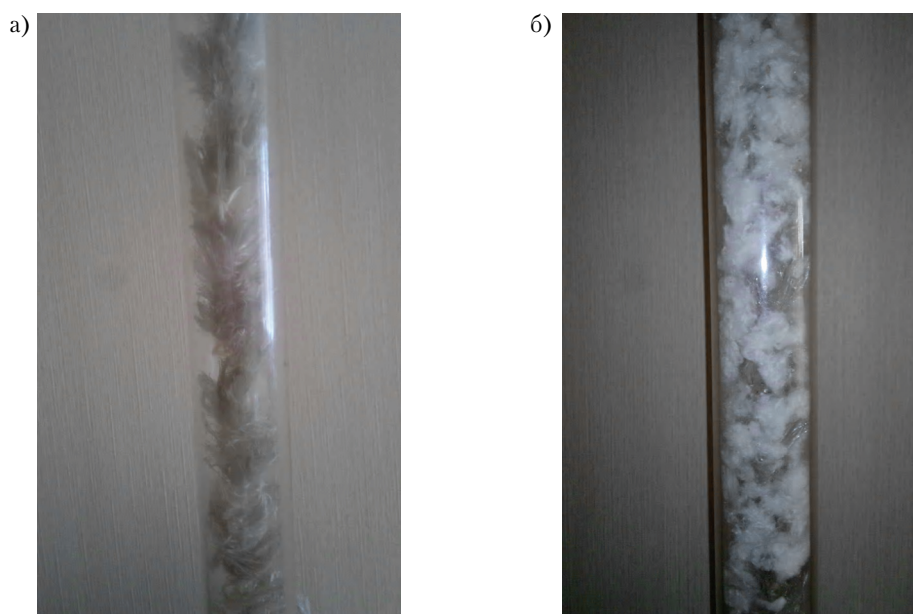
В опытах требовалось определить достаточное время накопления осадка в порах волокнистой насадки в зависимости от скорости фильтрования и крупности хлопьев, выносимых из насадки. Результаты представлены в табл.

**Таблица** – Оценка накопления осадка в порах волокнистой насадки

Скорость фильтрования, м/час	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Время накопления осадка, часов	5,7	4,0	2,8	2,0	1,5

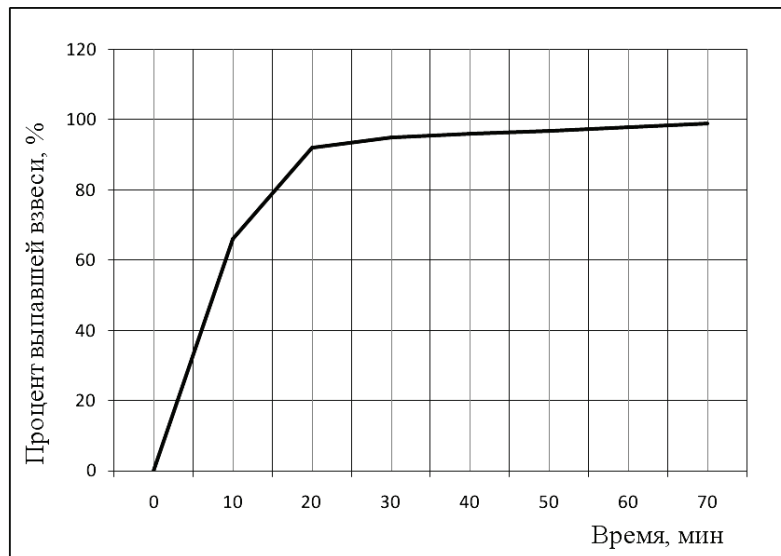
Время накопления осадка оценивалось как период времени между началом опыта и моментом проскока взвеси в фильтрат. В начале каждого опыта гидроксид алюминия, образующийся в результате гидролиза коагулянта сернокислого алюминия в виде коллоидных частиц и мелких хлопьев, прикреплялся к волокнам насадки и заполнял ее поровое пространство. После критического заиливания пор начинался вынос крупных хлопьев из насадки потоком фильтруемой воды.

На рис. 2 представлен вид колонки с ершом в двух состояниях: в начале и в конце опыта. Наглядно видно заиливание порового пространства насадки осадком из гидроксида алюминия.



**Рисунок 2** – Вид фильтровальной колонки с лавсановым ершом: а – в исходном состоянии, б – в заиленном состоянии.

Для оценки седиментационных свойств фильтрата с хлопьями он отбирался сразу в мерный цилиндр емкостью 1 л. На рис. 3 представлена седиментационная кривая осаждения для фильтрата, полученного при скорости фильтрования 1,0 м/час через 4 часа после начала опыта. Вид кривой свидетельствует о высоких седиментационных свойствах взвеси, полученной в волокнистой контактной камере хлопьеобразования. 90%-ный эффект осаждения достигается в течение 18 минут. При визуальной оценке размер хлопьев достигал 2...3 мм.



**Рисунок 3** – Седиментационная кривая фильтрата с хлопьями.

Параллельно оценивались потери напора в чистой и заиленной насадке. В незаиленной насадке в начале фильтроцикла потери напора составляли от 4 мм при скорости фильтрования 5 м/ч до 20 мм при скорости 20 м/ч. В конце фильтроцикла потери напора достигали 17 мм при скорости 5 м/ч и 43 мм при скорости 20 м/ч.

Для практического применения технологии рекомендуется заполнять волокнистой насадкой толщиной не менее 1 м пространство на выходе из существующих камер хлопьеобразования традиционных конструкций или устраивать новые камеры вертикального типа с восходящим потоком воды при новом строительстве. Гидравлическая нагрузка для рекомендуемых камер хлопьеобразования (важный расчетный параметр) может достигать 2,5 м<sup>3</sup>/ч на один м<sup>2</sup>. Этот параметр требует уточнения при технологических исследованиях процесса для конкретной воды. Следует иметь в виду, что для запуска в работу сооружения после строительства или ремонта потребуется до 6 часов. Может также потребоваться периодическая чистка волокнистой насадки от накопившихся загрязнений пузырьками сжатого воздуха по разработанной нами технологии [2]. В этом случае под волокнистой насадкой потребуется устроить распределительную систему сжатого воздуха из дырчатых труб. Возможно упрощение технологии чистки насадки. Поскольку эта операция в отличие от волокнистых фильтров потребуется значительно реже (предположительно дважды в год), она может выполняться параллельно с чисткой отстойников от осадка путем промывки волокнистой насадки струями воды из брандспойта.

## ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что контактная среда из синтетических волокон может служить эффективным генератором крупных хлопьев с большой гидравлической крупностью. Результаты исследований подтверждают возможность устройства контактных камер хлопьеобразования с волокнистой насадкой перед отстойниками при осветлении природных вод.

Волокнистые камеры хлопьеобразования создают малое гидравлическое сопротивление движению осветляемой воды, что упрощает высотную компоновку очистных сооружений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Омельченко, Н. П. Новые технологии осветления шахтных вод с целью их повторного использования [Текст] / Н. П. Омельченко, Л. И. Коваленко // Проблемы экологии. – Донецк : ДонНТУ, 2008. – № 1–2. – С. 8–12.
2. Омельченко, Н. П. Реконструкция шахтных отстойников для увеличения эффекта осветления [Текст] / Н. П. Омельченко, В. Р. Пудвиль // Проблемы экологии. – Донецк : ДонНТУ, 2002. – № 2. – С. 24–29.
3. Омельченко, Н. П. Новые технологии осветления шахтных вод с использованием волокнистых насадок [Текст] / Н. П. Омельченко, А. Ю. Сытник // Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях : сб. науч. докл. / Моск. гос. строит. ун-т. – М. : МГСУ, 2009. – С. 158–159.

- 4 Омельченко, Н. П. Волокнистые насадки для систем очистки воды [Текст] / Н. П. Омельченко, Л. И. Коваленко // Проблемы экологии. – Донецк : ДонНТУ, 2011. – № 1-2. – С. 12–17.
5. Neel, J. Fibrous filter [Текст] / J. Neel // V-th World Filtration Congress. – Nice, France : Water Publishing, 1990. – Vol. 1. – P. 420.

Получено 04.09.2014

М. П. ОМЕЛЬЧЕНКО <sup>a</sup>, Л. І. КОВАЛЕНКО <sup>b</sup>  
КОНТАКТНІ КАМЕРИ УТВОРЕННЯ ПЛАСТІВЦІВ З ВОЛОКНИСТОЮ  
НАСАДКОЮ

<sup>a</sup> Донбаська національна академія будівництва і архітектури, <sup>b</sup> Донецький національний технічний університет

Розглянуто пропозицію щодо використання волокнистої насадки із синтетичних волокон як контактне середовище для процесу утворення пластівців при висвітленні каламутних природних вод поверхневих джерел відстоюванням. Впровадження нової технології дозволяє одержувати якісні пластівці при низьких температурах і лужності води, запобігає замулюванню контактних камер утворення пластівців і відрізняється низьким гідравлічним опором навіть у замуленому стані. Проведено дослідження процесу утворення пластівців у волокнистому контактному середовищі, визначено оптимальні параметри процесу.

**оброблення води коагулянтами, контактна коагуляція, камера утворення пластівців, волокниста насадка, синтетичне волокно**

MYKOLA OMEL'CHENKO <sup>a</sup>, LIUDMYLA KOVALENKO <sup>b</sup>  
CONTACT FLOCCULATION CHAMBER PACKED WITH FIBER

<sup>a</sup> Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, <sup>b</sup> Donetsk National Technical University

Proposals for the use of the fiber tip from synthetic fibers as a contact environment for the process of flocculation at clarification of turbid natural water from surface sources with sedimentation method have been considered. Introduction of new technology allows you to receive high-quality flakes at low temperatures and alkalinity of water, prevents clogging of the pores of contact flocculation chambers and has a low flow resistance, even in muddy condition. The researches of the process of flocculation in fiber coupling environment have been carried out, the optimal process parameters have been determined.

**water treatment coagulants, contact coagulation, flocculation chamber, fibrous cap, synthetic fiber**

**Омельченко Микола Павлович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри водопостачання, водовідведення і охорони водних ресурсів Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: технології освітлення природних і промислових стічних вод.

**Коваленко Людмила Іванівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри природоохоронної діяльності Донецького національного технічного університету. Наукові інтереси: природоохоронні технології.

**Омельченко Николай Павлович** – кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: технологии очистки природных и промышленных сточных вод.

**Коваленко Людмила Ивановна** – кандидат технических наук, доцент кафедры природоохранной деятельности Донецкого национального технического университета. Научные интересы: природоохранные технологии.

**Omel'chenko Mykola** – PhD (Eng.), Associate Professor, Water Supply, Water Disposal and Water Resources Conservation and Protection Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: technologies of natural water and industrial sewage clarification.

**Kovalenko Liudmyla** – PhD (Eng.), Assistant Professor, Environment Protection Activity Department, Donetsk National Technical University. Scientific interests: environment protection technologies.

УДК 628.21

**Н. И. ГРИГОРЕНКО, О. В. МАЙСТРЕНКО**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## **АНАЛИЗ МЕТОДА РАСЧЕТА СИСТЕМ ВАКУУМНОЙ КАНАЛИЗАЦИИ, ИСПОЛЬЗУЕМОГО В ЗАРУБЕЖНОЙ ПРАКТИКЕ**

В статье выполнен анализ метода расчета систем вакуумной канализации, используемого в зарубежной практике. Определено, что его применение вызывает ряд осложнений при проектировании и встает актуальный вопрос научного обоснования и разработки более совершенного метода расчета системы вакуумной канализации для малых населенных пунктов.

**малые населенные пункты, вакуумное транспортирование сточной жидкости, расчет вакуумной канализации**

### **АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ**

Одним из перспективных решений проблемы канализования сел, поселков и малоэтажных застроек является применение гидропневматической вакуумной системы транспортирования стоков [1–3]. Использование данной технологии возможно уже сейчас, но только путем сотрудничества с иностранными фирмами, проекты которых основаны на эмпирических расчетных данных. Эмпирические таблицы, используемые для расчетов, к сожалению, не имеют под собой мощной теоретической базы и дают лишь ориентировочные значения. Также в этих таблицах представлены значения для стандартных проектов, т.е. для равномерного распределения подключений и плоскому рельефу местности. Для нестандартных проектов, например в случае подключения большого числа потребителей в конце участка, эта методика непригодна. Создание более точного метода расчета для различных случаев проектирования на сегодняшний день является первоочередной задачей.

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

Наружная вакуумная система канализационных сетей предназначена для сбора городских и промышленных сточных вод в малых населенных пунктах с малой плотностью заселения, а также для объектов временного пользования (лагеря, пансионаты, кемпинги) и санитарных зон водоемосточников. Вакуумная система является закрытой системой трубопроводов без возможности проникновения, т.е. отсутствуют смотровые колодцы, а значит и запахи, поступающие из них в атмосферу. В системе нет ревизионных колодцев и резервуаров для прочистки канализационных труб. Благодаря постоянно поддерживаемому отрицательному давлению в системе не возникают утечки сточных вод. Высокая скорость (от 3,5 до 5,0 м/с) транспортируемой смеси «жидкость-воздух» в трубах предотвращает образования отложений [1–4]. Самыми известными производителями вакуумных систем являются фирмы Roediger, Airvac, ISEKI, которые имеют множество филиалов по всему миру [5]. Наиболее известными учеными и инженерами, которые внесли существенный вклад в развитие вакуумного транспортирования сточных вод являются Liernur, J. Liljendahl, D. G. Quatfuss, M. Roediger, Alan F. Hussett, I. A. Cooper, J. W. Rezek, R. Betz, T. Asanagi, а также вопросу вакуумного транспортирования жидкости посвящены работы авторов статьи.

**Целью работы** являются анализ метода расчета, применяемого на практике за рубежом, который послужит основой для разработки рекомендаций по повышению эффективности расчета систем вакуумной канализации.

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Проектирование вакуумной системы состоит из:

- определения соотношений количества жидкости и воздуха в системе;
- определения диаметра труб;
- построения продольного профиля сети;
- гидropневматического расчета клапанов, сборных шахт, канализационных сетей, сборных резервуаров, вакуум-насосов.

Гидropневматический расчет системы должен быть проведен так, чтобы во время, когда нет притока, обеспечить в системе минимальный уровень вакуума, а время на восстановление вакуума не превышало заданного значения.

При подборе диаметра рекомендуется не увеличивать скорость потока больше необходимой для работы системы (увеличения трения, потери при ускорении). Увеличение соотношения «жидкость-воздух» в вакуумном клапане может увеличить производительность вакуумной системы. Благодаря увеличению притока воздуха в систему подается больше энергии, что позволит повысить скорость, но это приведет к увеличению потерь на трение. В гидropневматическом расчете необходимо учитывать как статические, так и динамические условия в сети.

Детальный гидродинамический расчет процесса транспортировки не может быть выполнен из-за неравномерности и постоянно меняющейся структуры потока. Недостаток теоретической базы обусловил тот факт, что для определения диаметра труб сети служат фиксированные решения в таблицах с ориентировочными значениями (табл. 1, 2) [6].

**Таблица 1** – Ориентировочные значения среднего соотношения «воздух-вода» в главном коллекторе

Длина главного коллектора, м	Среднее соотношение «воздух-вода» (LWV) при плотности населения			
	0,05 чел/м	0,1 чел/м	0,2 чел/м	0,5 чел/м
500	3,5–7	3–6	2,5–5	2–5
1 000	4–8	3,5–7	3–6	2,5–5
1 500	5–9	4–8	3,5–7	3–6
2 000	6–10	5–9	4–8	3,5–7
3 000	7–12	6–10	5–9	4–8
4 000	8–15	7–12	6–10	(5–9)*

\*Примечание: лишь в отдельных исключительных рекомендованных случаях.

**Таблица 2** – Ориентировочные значения для определения диаметров трубопроводов

Среднее соотношение «воздух-вода» (LWV)	Номинальный диаметр участков, мм						
	DN 65	DN 80	DN 100	DN 125	DN 150	DN 200	DN 250*
	Число жителей на участке, чел						
2	0–110	0–350	250–600	350–900	500–1 400	750–2 100	1 100–3 000
4	0–65	0–200	135–340	200–500	300–800	400–1 200	600–1 650
6	0–45	0–140	95–240	140–350	200–550	300–820	400–1 150
8	0–35	0–105	75–185	105–270	150–425	220–625	300–850
10	0–30	0–85	60–150	85–220	120–340	175–500	250–700
12	0–25	0–75	50–125	75–180	100–290	150–425	200–600

\*Примечание: рекомендуется только в особых случаях.

С помощью значений, перечисленных в таблице 2 определяется диаметр труб на участках сети в зависимости от количества жителей и среднего соотношения «воздух-вода», полученного по данным таблицы 1. Плотность населения в данном случае определяется как отношение числа жителей на рассматриваемом участке к длине главного коллектора.

В таблице 1 представлена зависимость среднего соотношения «воздух-вода» (LWV – Luft zu Wasser Verhältnis (нем.)) от плотности населения и длины главного коллектора вакуумной системы канализации. Отношение минимального предлагаемого значения LWV к максимальному для одного и того же случая составляет от 40 до 50 %, что вызывает затруднения в принятии наиболее точного и экономически оправданного значения при проектировании. Например, согласно табл. 1 для длины главного коллектора 500 м и плотности населения 0,05 чел/м величину LWV рекомендуется принимать от 3,5 до 7,0. Кроме того, отсутствуют какие-либо рекомендации для интерполирования или

другого способа определения конкретного значения  $LWV$  на расчетном участке. Т. е. проектировщик должен интуитивно либо на основании опыта эксплуатации выбрать оптимальную величину соотношения «воздух-вода» на участке, что не всегда возможно для специалистов, которые сталкиваются с данной задачей впервые.

Расчет вакуумной системы канализации основан на предположении, что все вакуумные клапаны на трассе трубопровода, начиная с конца наиболее удаленного участка до вакуумной станции, открыты. При этом условии определяется максимальная потеря гидростатического давления на расчетном участке сети. Данное допущение предполагает значительный запас вакуума, что зачастую экономически нецелесообразно.

При подробном рассмотрении табл. 2 можно увидеть, что при одном и том же соотношении «воздух-вода» и числе жителей, проживающих на расчетном участке, область рекомендуемых диаметров трубопровода лежит в пределах от двух до трех сортаментов. Рекомендации по выбору наиболее экономически оправданного диаметра трубопровода отсутствуют, что опять же может привести к затруднительным ситуациям при проектировании и удорожанию проекта при неправильном подборе трубопроводов вакуумной системы канализации. Например, по данным табл. 2 при среднем соотношении  $LWV = 4$  и числе жителей 200 человек на участке можно подобрать диаметр в диапазоне от 80 до 125 мм.

Существует еще несколько ограничений при использовании существующего метода расчета вакуумных систем транспортирования сточной жидкости. Расчет вакуумной системы канализации по существующему методу ограничен количеством жителей 2 100 человек (в особых случаях 3 000 человек). При этом количество жителей в малых населенных пунктах может насчитывать до 5 000 человек [7], что сужает область применения существующего метода расчета вакуумных канализационных систем даже в пределах малых населенных пунктов. При расчете систем вакуумной канализации существующий метод не учитывает изменения вакуумметрического давления на различных участках сети, а только предполагает его величину в пределах от 30 до 60 кПа [8].

Также необходимо отметить, что в Украине не практикуется определение диаметров и других параметров систем канализации в зависимости от количества жителей, т. е. расчетные таблицы или номограммы наиболее удобно представить в виде зависимости диаметра трубопровода от расхода сточной жидкости на расчетном участке [9].

Украина относится к индустриально-аграрным государствам, на ее территории, в том числе и в малых населенных пунктах, расположено довольно большое количество промышленных предприятий и сельскохозяйственных комплексов. При использовании метода расчета вакуумной системы канализации, предлагаемого зарубежными компаниями, расход сточных вод от объектов промышленности и сельского хозяйства необходимо переводить в эквивалентное количество жителей или искать другие способы выражения расхода сточных вод, что не совсем удобно. При использовании количества жителей, как основного показателя объема сброса сточной жидкости в определении диаметра трубопроводов, невозможно определить неравномерность поступления сточных вод в вакуумную сеть. Сброс сточных вод от населения и промышленных предприятий неравномерны [10], а отсутствие данных о притоке канализационных стоков в сборную емкость вакуумной насосной станции не позволяет точно рассчитать объем ее, а также режим и время работы вакуум-насосов. Поэтому, с инженерной точки зрения, целесообразно подбирать диаметр трубопровода в зависимости от расхода сточной жидкости, поступающей на расчетный участок.

Данные таблицы применимы для равномерного распределения подключений и плоской местности. В случае подключения большого числа людей в конце участка необходимо ориентировочно предусматривать иное соотношение воздуха и воды.

Таким образом, вышеуказанный метод расчета не может быть использован для нестандартных проектов. В случае возникновения ситуации, при которой применение таблицы 1 и таблицы 2 невозможны, рекомендовано пригласить поставщика системы. Отклонения от стандарта должны быть технически обоснованы. В частности, эксплуатационная безопасность может быть обеспечена посредством комплекса дополнительных технических мер, таких как автоматические аэрационные станции или блоки вакуумного клапана с прерывистым потреблением воды и подсосом воздуха.

Т. е. можно сказать, что применение зарубежных рекомендаций по расчету систем вакуумной канализации в нашей стране довольно проблематично и вызывает ряд осложнений при проектировании, а также не соответствует государственным строительным нормам [11], что в свою очередь делает актуальными научное обоснование и разработку более совершенного метода расчета системы вакуумной канализации для малых населенных пунктов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нездойминов, В. И. Применение вакуумной канализации для малых населенных пунктов в Украине [Текст] / В. И. Нездойминов, Н. И. Григоренко, Д. В. Заворотный // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХОТБ АБУ, 2010. – (60). – С. 241–247.
2. Математическое описание газожидкостной структуры потока в системе транспортирования жидкости под вакуумом [Текст] / В. И. Нездойминов, В. С. Рожков, Н. И. Григоренко, Д. В. Заворотный // Motrol. Commision of Motorization and Energetics in Agriculture. – 2013. – Vol. 15, № 6. – P. 125–132.
3. Нездойминов, В. И. Применение на практике модели расчета системы вакуумной канализации [Текст] / В. И. Нездойминов, Н. И. Григоренко // Вестник БрГТУ «Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология». – 2013. – № 2 (80). – С. 57–60.
4. Hagan, D. C. Alternative Wastewater Study [Text] / D. C. Hagan. – Florida : Greeley and Hansen, 2007. – 153 p.
5. Чередниченко, И. Л. Вакуумная канализация – инновационная технология для сбора сточных вод [Текст] / И. Л. Чередниченко // С. О. К. – 2009. – № 1. – С. 16–19.
6. Hawn, C. Understanding Vacuum Sewer Technology [Text] / C. Hawn // Water Environment & Technology (WE&T). – 2011. – Vol. 23, No. 5. – P. 1–4.
7. Положення про порядок вирішення питань адміністративно-територіального устрою Української РСР [Електронний ресурс] : Постанова № 1654-X від 12.03.1981: із змінами, внесеними згідно із Законом N 4865-VI від 24.05.2012 // Законодавство України. – Режим доступу : <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1654-10> – Загол. з екрану.
8. Manual. Alternative Wastewater Collection Systems [Text] : EPA/625/1-91-024 / Authors: Wiliam C. Bowne, Richard C. Naret, Richard J. Otis. – October 1991. – Washington, DC : U.S. Government Printing Office, 1991. – 207 p.
9. Лукиных, А. А. Таблицы для гидравлического расчета канализационных сетей и дюкеров по формуле акад. Н. Н. Павловского [Текст] / А. А. Лукиных, Н. А. Лукиных. – Изд. 4-е, доп. – М. : Стройиздат, 1974. – 156 с.
10. Водоотведение и очистка сточных вод [Текст] : Учебник для ВУЗов / С. В. Яковлев, Я. А. Карелин, Ю. М. Ласков, В. И. Калицун. – М. : Стройиздат, 1996. – 392 с.
11. ДБН В.2.5-75:2013. Державні будівельні норми України. Каналізація зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. – На заміну СНиП 2.04.03-85 ; чинні від 2014-01-01. – Київ : Мінрегіон України, 2013. – 113 с.

Получено 05.09.2014

Н. І. ГРИГОРЕНКО, О. В. МАЙСТРЕНКО  
АНАЛІЗ ЗАКОРДОННОГО МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ СИСТЕМ ВАКУУМНОЇ  
КАНАЛІЗАЦІЇ

Донбаська національна академія будівництва і архітектури

У статті виконано аналіз методу розрахунку систем вакуумної каналізації, що використовується в зарубіжній практиці. Визначено, що його застосування спричиняє ряд ускладнень при проектуванні і встає актуальне питання наукового обґрунтування і розроблення більш досконалого методу розрахунку системи вакуумної каналізації для малих населених пунктів.

**малі населені пункти, вакуумне транспортування стічної рідини, розрахунок вакуумної каналізації**

NADEZHDA GRIGORENKO, OLGA MAJSTRENKO  
ANALYSIS OF THE CALCULATION METHOD OF VACUUM SEWER SYSTEMS  
USED IN FOREIGN PRACTICE

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

This article gives an analysis of the calculation method of vacuum sewer systems used in the foreign practice. It has been determined that application of this method has some complications in the design and raises urgent question of scientific substantiation and development of improved methods of calculating vacuum sewer systems for small communities.

**small communities, vacuum transportation of wastewater, calculation of vacuum sewer system**

**Григоренко Надія Іванівна** – асистент кафедри водопостачання, водовідведення і охорони водних ресурсів Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: каналізування малих населених пунктів, транспортування стічних вод під дією вакууму, процеси в газорідних системах в умовах негативного тиску.

**Майстренко Ольга Викентьевна** – асистент кафедри водовідведення і охорони водних ресурсів Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: каналізаційні системи малих населених пунктів, розрахунок водовідвідних мереж.

**Григоренко Надежда Ивановна** – асистент кафедри водоснабження, водоотведения и охраны водных ресурсов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: канализование малых населенных пунктов, транспортировка стоков под действием вакуума, процессы в газожидкостных системах в условиях отрицательного давления.

**Майстренко Ольга Викентьевна** – асистент кафедри водоснабження, водоотведения и охраны водных ресурсов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: канализационные системы малых населённых пунктов, расчет водоотводящих сетей.

**Grigorenko Nadezhda** – Assistant, Water Supply, Water Disposal and Water Resources Conservation and Protection Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: the sewer systems of small settlements, transporting sewage under vacuum, processes in gas-liquid systems under negative pressure.

**Majstrenko Olga** – Assistant, Water Supply, Water Disposal and Water Resources Conservation and Protection Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: sewer system of small settlements, calculation of sewage networks.



УДК 628.511

**С. М. ОРЛОВ, А. Я. ОРЛОВА**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИКЛОНОВ «ПРАВОГО» И «ЛЕВОГО» НАПРАВЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЯ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ ЗЕМЛИ**

Проведен анализ процессов, протекающих в циклоне с таким природным явлением, как торнадо. Установлено, что многие процессы в циклоне и торнадо аналогичны. Имеется существенное различие в масштабах явления и в уровне электромагнитных процессов, протекающих в циклоне и торнадо. В нашей стране применяются циклоны как «правого», так и «левого» направления вращения газового потока, в то время как вихрь в торнадо в северном полушарии направлен против часовой стрелки. Рассмотрены существующие теории, описывающие образование и существование торнадо. Сделан вывод, что при помощи существующей теории сделать обоснование предпочтительности применения того или иного вида циклона в зависимости от полушария Земли затруднительно. Предложено установить предпочтительность применения того или иного вида циклона в зависимости от полушария Земли экспериментально.

**циклон, торнадо, давление, скорость**

Воздушные выбросы промышленных предприятий наносят вред окружающей природной среде, загрязняют атмосферу промышленных площадок и жилых районов, что влияет на здоровье людей, увеличивает потребность в проведении различного рода профилактических и медицинских мероприятий, приводит к дополнительным экономическим потерям.

Техника обеспыливания характеризуется большим разнообразием конструкций и форм исполнения обеспыливающего оборудования.

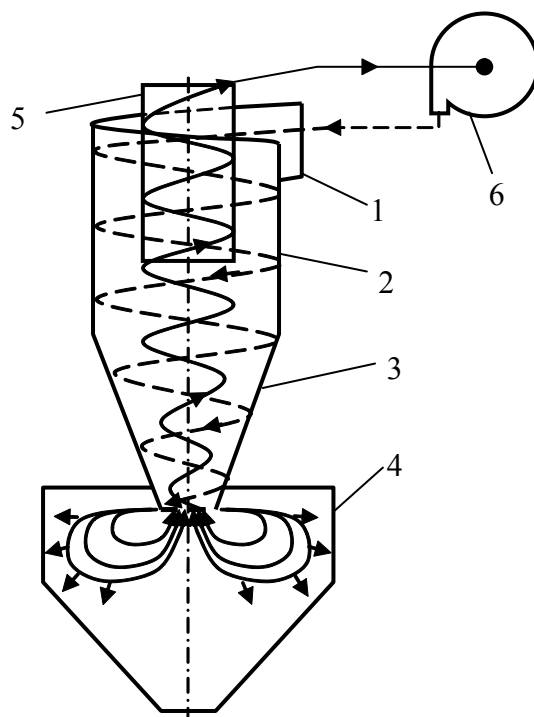
Циклоны являются наиболее характерными представителями сухих инерционных пылеуловителей, которые, как правило, имеют простую конструкцию, обладают большой пропускной способностью и несложны в эксплуатации. Ввиду этих преимуществ циклоны получили широкое распространение.

Общая схема циклона представлена на рис. 1 [1]. Запыленный воздух вводится тангенциально в верхнюю часть циклона, представляющую собой закручивающий аппарат. Сформировавшийся здесь вращающийся поток опускается по кольцевому пространству, образуемому цилиндрической частью циклона и выхлопной трубой, в его коническую часть, а затем, продолжая вращаться, выходит из циклона через выхлопную трубу. Непременное условие – это замкнутость потока (условно показано через вентилятор, который создает перепад давления).

Все циклоны могут выполняться как для «правого», так и для «левого» вращения газового потока. «Правым» принято называть вращение газового потока в циклоне по часовой стрелке, если смотреть со стороны выхлопной трубы; «левым» – вращение против часовой стрелки.

Наиболее важной характеристикой циклона является его производительность, т. е. объем воздуха, который очищается за один час (расход воздуха, измеряемый в м<sup>3</sup>/ч).

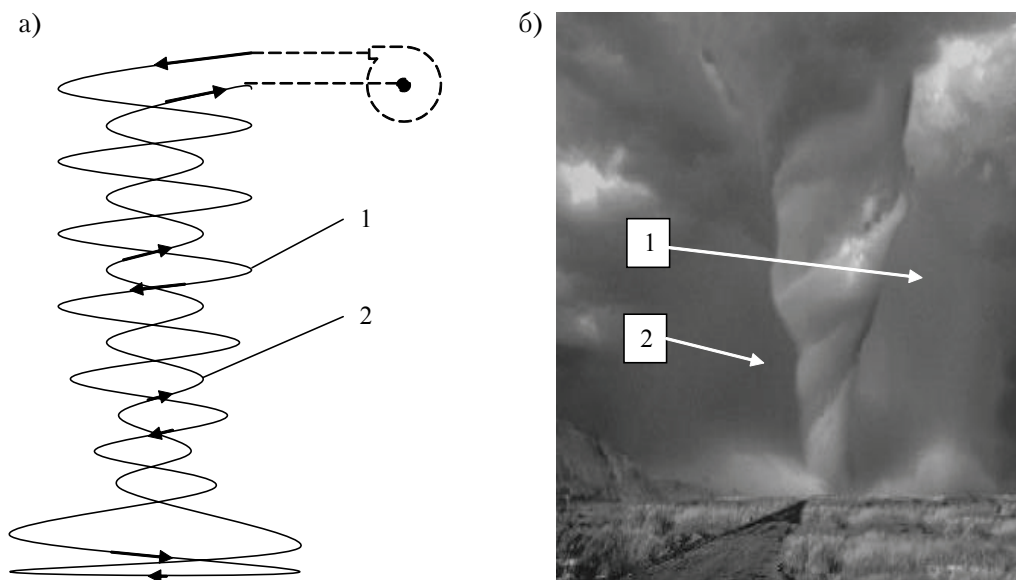
Циклоны обычно подразделяются на высокоэффективные и высокопроизводительные [2, 3]. Аппараты первого типа отличаются более высокой степенью очистки, но требуют больших затрат энергии на осуществление процесса очистки, вторые имеют небольшое гидравлическое сопротивление, т.е. требуют меньше затрат энергии на очистку, обеспечивают большую производительность, но более низкую степень очистки [4, 5]. В настоящее время имеется множество работ как теоретического,



**Рисунок 1** – Схема циклона: 1 – входной патрубок; 2 – цилиндрическая часть циклона; 3 – коническая часть циклона; 4 – пылесадительный бункер; 5 – выхлопная труба; 6 – вентилятор.

так экспериментального плана. На их основе разработано множество типов циклонов, однако точку ставить в этом вопросе достаточно рано.

Для того чтобы приступить к решению данной задачи, необходимо детально рассмотреть работу циклона и все процессы, протекающие в нем. Основываясь на рис. 1, изобразим винтовые линии тока при отсутствии стенок циклона (рис. 2а).

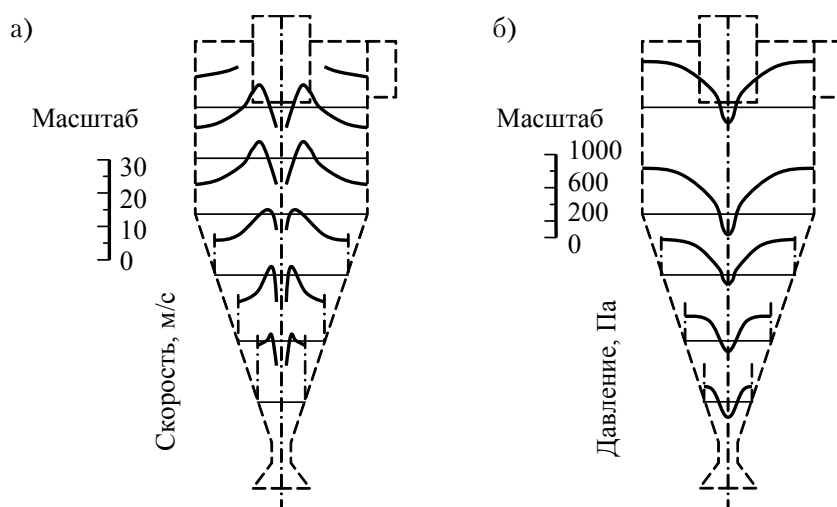


**Рисунок 2** – Винтовые линии тока при отсутствии стенок циклона (рисунок а) и нисходящие «1» и восходящие «2» винтовые линии тока торнадо (рисунок б).

В природе существуют явления, где воздух в силу различных причин естественно закручивается в восходящие и нисходящие винтовые спирали (смерчи, торнадо и др.) (рис. 26). Различие между смерчем и торнадо заключается лишь в том, что смерчи возникают над водной поверхностью, а торнадо – над сушей.

Поскольку циклон производит очистку воздуха от пыли, то в дальнейшем будем использовать определение этому природному явлению «торнадо». Как видно из приведенного рисунка, процессы, протекающие в циклоне и в торнадо, внешне схожи. Как в циклоне, так и в торнадо имеется ядро вихря, которое вращается по законам твердого тела с постоянной угловой скоростью. Разрежение в центре восходящего ядра наибольшее, что позволяет торнадо поднимать на большую высоту достаточно тяжелые предметы (машины, дома и др.), в циклоне по этой же причине наблюдается проскок достаточно больших частиц пыли.

На рис. 3 представлено изменение статического давления и тангенциальных составляющих скоростей, замеренное Тер-Линденом в нескольких поперечных сечениях циклона [6].



**Рисунок 3** – Изменение тангенциальных составляющих скоростей (а) и статического давления (б) в поперечных сечениях циклона.

Аналогичную картину для тангенциальных скоростей и распределения давления можно наблюдать и в торнадо. Разница состоит только в масштабах: тангенциальная скорость в циклонах редко превышает 20 м/с, а тангенциальная скорость в торнадо может достигать сверхзвуковых скоростей; аналогично и для давлений, в циклоне перепад давления редко превышает 2 000 Па, в торнадо эта величина может достигать десятых долей атмосфер.

Следует отметить, что торнадо в северном полушарии закручивается против часовой стрелки, а в южном полушарии по часовой стрелке. На экваторе никогда не бывает торнадо. Как было отмечено ранее, в промышленности применяются циклоны как для «правого», так и для «левого» вращения газового потока. Следовательно, поскольку процессы, происходящие в циклоне и торнадо схожи, то необходимо на вопрос целесообразности применения в северном полушарии циклонов «правого» или «левого» вращения газового потока обратить внимание.

Существует множество теорий возникновения и существования торнадо.

**Теория Кориолисовой силы и конвекционных потоков воздуха** [7]. Сущность этого явления заключается в следующем.

Законы Ньютона в их первоначальном виде справедливы для инерционных систем отсчета – систем, движущихся равномерно и прямолинейно. Однако, находясь на Земле, нам удобно связать систему отсчета с ее поверхностью. Это и есть система географических координат. Она не является инерционной, поскольку Земля вращается. Можно переписать второй закон Ньютона так, чтобы он был справедлив во вращающейся системе отсчета. Но при этом в правую часть его нужно добавить силу. Называется она силой Кориолиса.

Сила Кориолиса перпендикулярна скорости материальной точки и пропорциональна скорости. Кроме того, сила Кориолиса зависит от широты места как  $\sin \varphi$ . Общее выражение для нее таково:

$$F_{\text{Кор}} = 2m\omega_{\oplus}v\sin\varphi;$$

где  $m$  – масса тела (воздуха);  
 $\omega_{\oplus}$  – угловая скорость Земли;  
 $v$  – скорость воздуха.

Таким образом, в северном полушарии  $\sin\varphi > 0$ , на экваторе  $\sin\varphi = 0$ , а в южном полушарии  $\sin\varphi < 0$ . Следовательно, в северном полушарии сила Кориолиса направлена против часовой стрелки, в южном полушарии сила Кориолиса направлена по часовой стрелке, а на экваторе сила Кориолиса равна нулю.

**Электромагнитная теория торнадо** [8]. Предложен плазменно-капельный механизм образования смерча – интенсивного атмосферного вихря, вращающегося под грозовым облаком. Смерч рассматривается как контролируемый прилипанием газовый разряд, создаваемый в атмосфере сильным облачным зарядом в присутствии геомагнитного поля. Построена общая теория атмосферно-облачного разряда.

**Плазменная теория смерча** [9]. В работе предложен механизм образования и построена плазменная теория смерча. Смерч рассматривается как стационарный газовый разряд, который создается капельным облачным зарядом. Найдены электрические поля, токи, электромагнитные силы, поля скоростей.

**Электромагнитогидродинамическая теория смерча (ЭМГД)** [10]. В этой теории показано, что одной из причин возникновения торнадо может служить взаимодействие электрических и магнитных полей с электрически заряженной средой материнского облака. В пользу такого подхода говорят многочисленные наблюдения, которые свидетельствуют о протекании интенсивных электрических процессов в воронке торнадо и вблизи неё.

Измерения электрических параметров атмосферы и различные природные явления, например «сухие грозы» и грозы во время снегопадов, свидетельствуют о протекании активных электрических процессов в самых различных условиях, при различных состояниях атмосферной влаги. С учетом этого одним из подтверждений участия электромагнитных сил в образовании торнадо могло бы служить возникновение воронки в отсутствии материнского облака. И такие факты существуют. Так, приводятся описания случая возникновения воронки над морем при ясной погоде. При этом материнское грозовое облако сформировалось сразу после образования смерча.

**Интегральная электромагнитогидродинамическая и термическая теория (ИЭМГДТ)** [11].

Авторами были проведены ряд экспериментов на основе помещения модели Земли в сосуд с электропроводной жидкостью (рис. 4) [11]. Проведенные эксперименты имеют много аналогий с Землей.

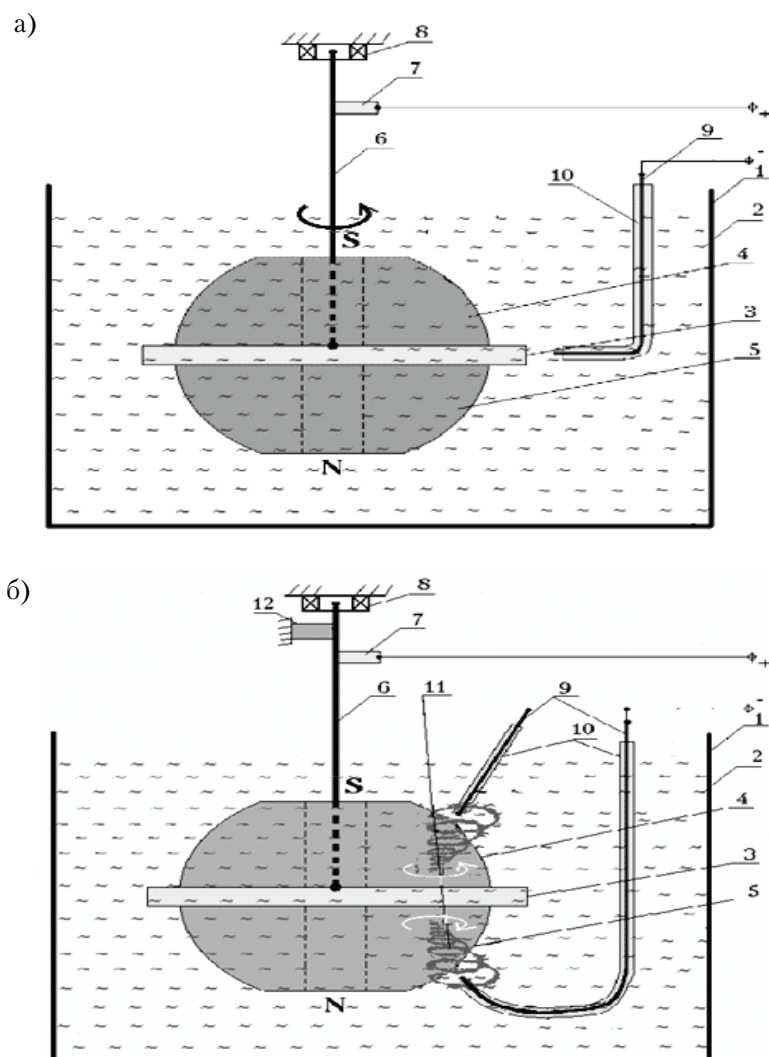
Как известно, в экваториальной зоне Земли никогда не бывает тайфунов, смерчей и циклонов (рис. 4а). Ветры в циклонах в северном полушарии дуют против часовой стрелки, а в циклонах в южном полушарии дуют по часовой стрелке (рис. 4б). В этом проявляется полное совпадение с проведенными экспериментами. Направления ветров в циклонах против часовой стрелки в северном полушарии и по часовой стрелке в южном полушарии традиционно объяснялось влиянием отклоняющей силы Кориолиса, возникающей при вращении Земли [11]. Отсутствием силы Кориолиса на экваторе соответственно традиционно объяснялось отсутствие циклонов в зоне экватора.

Авторы считают, что в механизме образования циклонов, торнадо, смерчей основной вклад вносит не сила Кориолиса и конвекционные потоки воздуха, а электрические токи в атмосфере и магнитное поле Земли. Сила Кориолиса также проявляется, но она не является единственной и основной. Однако силу Кориолиса традиционно считали единственной, в то время как она лишь маскирует тот физический эффект, который играет основную роль. Эти два фактора действуют совместно.

Анализируя приведенное теоретическое обоснование развития и существования торнадо, а также существующую теорию расчета эффективности циклонов, в которой вообще нет упоминания о направлении вращения газового потока, приходим к выводу, что вопрос предпочтительности применения в северном полушарии циклонов «левого» или «правого» направления вращения газового потока нужно выяснить экспериментально.

## ВЫВОДЫ

1. Установлено, что процессы, протекающие в циклонах и торнадо, во многом схожи, основное различие состоит только в масштабах явления.



**Рисунок 4** – Схема эксперимента моделирующего отсутствия локальных вихрей в экваториальной зоне (а) и образования локальных вихрей в северном и южном полушариях (б): 1 – сосуд; 2 – вода; 3 – диск (медь); 4, 5 – магнит кольцевой; 6 – ось (медь); 7 – электрод (+); 8 – подшипник; 9 – электрод (-); 10 – изолятор; 11 – вихрь; 12 – тормозное устройство.

2. Показано, что в северном полушарии применяются циклоны как «левого», так и «правого» направления вращения газового потока, в то время как в природе в северном полушарии воздушные потоки естественно закручиваются против часовой стрелки (торнадо, смерчи, тайфуны и др.).

3. Установлено, что вопрос предпочтительности применения в северном полушарии циклонов «левого» или «правого» направления вращения газового потока нужно выяснить экспериментально.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пылеулавливание в металлургии [Текст] / Под ред. А. А. Гурвица. – М. : Металлургия, 1984. – 336 с.
2. Дьяков, В. В. Теоретические и экспериментальные исследования течения газа в циклоне [Текст] / В. В. Дьяков, В. К. Рожнева, А. М. Платонов // Горный журнал. – 1981. – № 3. – С. 41–46.
3. Ичев, Б. Р. Математическое моделирование процесса пылеуноса в центробежном циклоне [Текст] / Б. Р. Ичев, Ю. Б. Ичева // Качество. Инновации. Наука. Образование : матер. междунар. науч.-техн. конф. Кн. 1 / СибАДИ. – Омск : Изд-во СибАДИ, 2005. – С. 220–223.
4. Шиляев, М. И. Методы расчета и принципы компоновки пылеулавливающего оборудования [Текст] / М. И. Шиляев, А. П. Дорохов. – Томск : Изд-во ТГАСУ, 1999. – 209 с.

5. Шиляев, А. М. Пылеулавливающие характеристики каскадных систем на основе прямооточных циклонов [Текст] / А. М. Шиляев, В. С. Рекунов // 4 Международ. шк.-семинар, Санкт-Петербург, 28 июня – 03 июля, 2004 : Сб. материалов : В 2 т. Т. 2. / Российская академия наук. – СПб. : [б. и.], 2004. – С. 200–203.
6. Пирумов, А. И. Обеспыливание воздуха [Текст] / А. И. Пирумов. – М. : Стройиздат, 1981. – 296 с.
7. Бялко, А. В. Наша планета – Земля [Текст] / А. В. Бялко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1989. – 240 с. – (Библиотечка «Квант»).
8. Боев, А. Г. Электромагнитная теория смерча. I ч. Электродинамика вихря [Текст] / 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. – 2008. – № 4 : Плазменная электроника и новые методы ускорения. – С. 133–138.
10. Меркулов, В. И. Электрогравитационная модель НЛО, торнадо и тропического урагана [Текст] / В. И. Меркулов. – Новосибирск : издательство Института математики, 1998. – 287 с.
11. Скорер Р. Аэрогидродинамика окружающей среды / Р. Скорер. – М. : Мир, 1980. – 552 с.

Получено 08.09.2014

С. М. ОРЛОВ, А. Я. ОРЛОВА

ДОСЛІДЖЕННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЦИКЛОНІВ «ПРАВОГО»  
І «ЛІВОГО» НАПРЯМУ ОБЕРТАННЯ В ПІВНІЧНІЙ ПІВКУЛІ ЗЕМЛІ  
Донбаська національна академія будівництва і архітектури

Проведено аналіз процесів, що протікають в циклоні з таким природним явищем, як торнадо. Встановлено, що багато процесів в циклоні і торнадо аналогічні. Є істотне розходження в масштабах явища і в рівні електромагнітних процесів, що протікають в циклоні і торнадо. У нашій країні застосовуються циклони «правого» і «лівого» напрямку обертання газового потоку, на той час як вихор в торнадо в північній півкулі спрямований проти годинникової стрілки. Розглянуто існуючі теорії, що описують утворення та існування торнадо. Зроблено висновок, що за допомогою існуючої теорії зробити обґрунтування переваги застосування того чи іншого виду циклону залежно від півкулі Землі важко. Запропоновано встановити перевагу застосування того чи іншого виду циклону залежно від півкулі Землі експериментально.

**циклон, торнадо, тиск, швидкість**

STANISLAV ORLOV, ALLA ORLOVA

STUDY THE FEASIBILITY OF USING CYCLONES «RIGHT» AND «LEFT»  
DIRECTION OF ROTATION IN THE NORTHERN HEMISPHERE OF THE  
EARTH

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

The analysis of the processes, occurring in the cyclone with such natural phenomena as tornadoes has been carried out. It has been determined that many processes in the cyclone and tornado are similar. There is a significant difference in the scale of the phenomenon in the level of electromagnetic processes in the cyclone and tornado. In our country cyclones are applied as «right» and «left» directions of rotation of the gas stream, while the vortex of a tornado in the northern hemisphere is directed counterclockwise. Existing theories, describing the formation and existence of a tornado, has been considered. It is concluded that using existing theory to make the rationale for the preferential use of a particular type of cyclone, depending on the hemisphere of the Earth is difficult. It is proposed to establish a preference for use of a particular type of cyclone depending on the hemisphere Earth experimentally.

**cyclone, tornado, pressure, speed**

**Орлов Станіслав Михайлович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри електротехніки і автоматики Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: автоматизація процесів і апаратів систем теплогазопостачання і вентиляції.

**Орлова Алла Яківна** – старший викладач кафедри теплотехніки, теплогазопостачання і вентиляції Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: вентиляція і кондиціонування приміщень житлових і громадських будівель.

**Орлов Станислав Михайлович** – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: автоматизация процессов и аппаратов систем теплогазоснабжения и вентиляции.

**Орлова Алла Яковлевна** – старший преподаватель кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: вентиляция и кондиционирование помещений жилых и общественных зданий.

**Orlov Stanislav** – PhD (Eng.), Associate Professor, Electrical Engineer and Automatics Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: automation of processes and devices of systems heat and gas supply and ventilation.

**Orlova Alla** – senior teacher, Heating Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: ventilation and conditioning of dwelling and public premises.

УДК 628.12

**В. С. РОЖКОВ, Д. В. ЗАВОРОТНЫЙ**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## **ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ В СИСТЕМАХ ПОДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ**

Рассмотрены распространенные при проектировании систем подачи и распределения воды решения с точки зрения энергетической эффективности. Приведено краткое описание оборудования, необходимого для преобразования частоты оборотов двигателей. Представлены технико-экономические показатели эффективности реконструкции красноармейской водопроводной насосной станции с применением насосов с частотно-регулируемыми приводами.

**водопроводная насосная станция, дросселирование, частотно-регулируемый привод, экономическая эффективность**

Количество воды, потребляемой жителями и промышленностью того или иного населенного пункта, значительно меняется в зависимости от времени суток и от времени года. Для того чтобы обеспечить неравномерные нужды водопотребителей, системы подачи и распределения воды (СПРВ) либо оборудуются аккумулялирующими емкостями, либо предусматривают постоянное изменение подачи воды насосной станцией в водопроводную сеть.

При использовании в системе водоснабжения водонапорных резервуаров разница между подачей водопроводной насосной станции и фактическим потреблением воды компенсируется за счет опорожнения и заполнения аккумулялирующих емкостей по мере необходимости. Таким образом, аккумулялирующие емкости на водопроводных сетях позволяют насосным станциям подавать воду с несколькими определенными расходами, при соблюдении КПД насосов близкого к максимальному. Однако проектирование СПРВ с водонапорными башнями предусматривает значительные капитальные вложения на их возведение, эксплуатационные затраты, связанные с их обслуживанием, и, как правило, такие системы требуют создания повышенных напоров, что ведет к увеличению как потерь воды в результате утечек из сети и водоразборной арматуры, так и затрачиваемой на ее перекачивание электроэнергии.

Одним из методов регулирования производительности насосной станции является дросселирование. В этом случае при необходимости снизить создаваемый водопроводной насосной станцией напор производят частичное перекрытие потока запорно-регулирующей арматурой. Использование дросселирования как метода регулирования производительности является простым в эксплуатации и не предусматривает каких-либо дополнительных капитальных затрат по сравнению с другими методами. В то же время в результате дросселирования значительное количество электроэнергии расходуется на преодоление создаваемых дросселем напоров, что не имеет места при изменении частоты оборотов как метода регулирования производительности насосных станций. Преобразование частоты вращения двигателя насосного агрегата приводит к изменению всех характеристик насоса: создаваемый напор снижается до необходимого для подачи требуемого расхода воды значения, значение максимального КПД смещается в том же направлении что и рабочая точка, существенно уменьшается потребляемая агрегатом мощность.

Низкий уровень использования регулируемых электроприводов в системах водоснабжения объясняется, с одной стороны, отсутствием до последнего времени надежных преобразователей частоты (ПЧ), пригодных для тяжелых условий эксплуатации, с другой стороны, существовавшей в 80-х годах ценовой политикой относительно энергоносителей.

© В. С. Рожков, Д. В. Заворотный, 2014



Частотно-регулируемый привод (ЧРП) состоит из электродвигателя и преобразователя частоты (ПЧ). Оптимальная по энергетическим показателям, регулировочным и механическим характеристикам структура ПЧ включает в себя выпрямитель с индуктивно-емкостным фильтром постоянного напряжения и автономный инвертор напряжения, построенный на силовых транзисторах. Управление электроприводом может быть местным со встроенного пульта управления, дистанционное с дистанционного пульта управления, дистанционное от внешней автоматической системы управления (АСУ) или персонального компьютера по каналам последовательной связи. Микропроцессорная АСУ формирует сигналы управления инвертором согласно алгоритму, позволяющему максимально использовать напряжение источника с минимальными искажениями формы выходного напряжения. Она обеспечивает: автоматическое определение параметров и самотестирование подключенного оборудования; цифровую индикацию текущих значений переменных электропривода, параметров регулятора, значений установок защиты; изменение параметров двигателя и регулятора со встроенного пульта управления при вводе пароля доступа к режиму программирования.

Красноармейская насосная станция третьего подъема до реконструкции имела подачу 6 050 м<sup>3</sup>/ч при общей установленной мощности насосных агрегатов 3 560 кВт. На протяжении продолжительного периода эксплуатации станции фактическая подача воды потребителям уменьшилась на 37 % по сравнению с проектной производительностью. Уменьшение подачи воды потребителям в подающих напорных трубопроводах требовало снижения напора воды на насосах, подающих воду до потребителей. Для подачи требуемого количества питьевой воды потребителям 3 232 м<sup>3</sup>/час необходимо было предусмотреть замену существовавшего оборудования новыми насосными агрегатами с общей установленной мощностью 1 545 кВт, при этом ориентировочный расход электроэнергии после реконструкции насосной станции необходимо уменьшить на 57 %.

Существующее оборудование не могло изменить режим уменьшенного объема подаваемой воды потребителям с учетом экономии электроэнергии, поэтому была произведена замена насосных агрегатов и системы электроснабжения. Новое насосное оборудование было подобрано не только в соответствии с требуемым количеством питьевой воды потребителям, но и с использованием ЧРП, также была предусмотрена реконструкция трубопроводов камеры переключения напорных трубопроводов с учетом изменения расходов и направлений подачи воды потребителям, изменения схемы установки резервных насосных агрегатов. Выбор изменения частоты оборотов для регулирования производительности станции был произведен с целью энергосбережения, на основании соответствующих технико-экономических расчетов.

При оценке экономической эффективности внедрения частотного преобразования учитывались капитальные затраты на строительство сооружений и текущие затраты на покупку электроэнергии. Сравнительная экономическая эффективность оценивалась по приведенным затратам на единицу продукции (м<sup>3</sup> воды)

$$\Pi = \frac{C_i + E_n \cdot K_i}{A}, \quad (1)$$

где  $C_i$  – текущие годовые эксплуатационные расходы на работу систем оборотного водоснабжения по  $i$ -му варианту, грн./год;

$K_i$  – капитальные затраты по  $i$ -му варианту, грн.;

$E_n$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, равный 0,15;

$A$  – годовой объем выпускаемой продукции (количество воды), м<sup>3</sup>.

За базовый вариант принята методика дросселирования (вариант до реконструкции).

Расчет капитальных и эксплуатационных затрат по вариантам проводился по данным [6] на примере насосной станции 3-го подъема Красноармейской фильтровальной станции (табл. 1).

Годовой экономический эффект определяется по формуле

$$\mathcal{E} = (C_b + E_n \cdot K_b) - (C_{\Pi} + E_n \cdot K_{\Pi}), \quad (2)$$

где  $C_b$  и  $C_{\Pi}$  – эксплуатационные затраты по базовому и предлагаемому вариантам;

$K_b$  и  $K_{\Pi}$  – капитальные затраты по базовому и предлагаемому вариантам.

Таким образом, годовой экономический эффект внедрения частотного регулирования (табл.) составляет

$$\mathcal{E} = (3\,670 + 0,15 \cdot 0) - (1\,430 + 0,15 \cdot 3\,100) = 1\,895 \text{ тыс. грн. / год.}$$

Таблица – Укрупненные показатели затрат при оптимизации работы насосной станции 3-го подъема

Показатель	при использовании дросселирования	при переходе на частотное регулирование
Капитальные затраты на строительство сооружений	0	3,1 млн грн.
Покупка электроэнергии	3,02 млн грн. / год	1,03 млн грн. / год
Годовые затраты на эксплуатацию сооружений	650 тыс. грн. / год	400 тыс. грн. / год
Итого затраты капитальные / текущие	0 млн грн. / 3,67 млн грн. / год	3,1 млн грн. / 1,43 млн грн. / год

Срок окупаемости капитальных затрат составил:

$$\Phi = \frac{C_n}{\Xi} = \frac{3100}{1895} = 1,63 \text{ года.} \quad (3)$$

### ВЫВОДЫ

1. Устройство частотно-регулируемых электроприводов на насосных станциях, подающих воду на нужды населенных пунктов с безбашенными системами водоснабжения, значительно сокращает энергопотребление насосных агрегатов.

2. Реконструкция красноармейской водопроводной насосной станции коммунального предприятия «Вода Донбасса» существенно повысила эффективность работы ее насосного оборудования.

3. В настоящее время необходимо внедрять частотное преобразование на многих насосных станциях, регулирование работы которых осуществляется путем дросселирования. Это требует предварительного детального изучения режимов потребления и параметров существующих СПРВ объектов водоснабжения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эгильский, И. С. Опыт проектирования и внедрения АСУ технологических процессов водоснабжения [Текст] / И. С. Эгильский. – М. : ЦПНТО КХиБ, 1985. – 78 с.
3. Пособие по проектированию автоматизации и диспетчеризации систем водоснабжения (к СНиП 2.04.02-84) [Текст] / П. А. Беленькая, А. Е. Высота, И. М. Хинчин [и др.]. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 59 с.
2. Хоружий, П. Д. Расчет гидравлического взаимодействия водопроводных сооружений [Текст] : монография / П. Д. Хоружий. – Львов : Выща школа, 1984. – 152 с.
4. Справочник проектирования АСУТП [Текст] / Г. Л. Смилянский, Л. З. Английский, В. З. Баранов [и др.] ; Под ред. Г. Л. Смилянского. – М. : Машиностроение, 1983. – 254 с.
5. Скрябин, Л. Ф. Построение и использование обобщенных характеристик водопроводной сети [Текст] / Л. Ф. Скрябин // Научные труды АКХ. – М. : ОНТИ АКХ, 1975. – Вып. 107. – С. 68–75.

Получено 09.09.2014

### В. С. РОЖКОВ, Д.В. ЗАВОРОТНИЙ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ РІШЕННЯ В СИСТЕМАХ ПОДАЧІ ТА РОЗПОДІЛУ ВОДИ

Донбаська національна академія будівництва і архітектури

Розглянуті розповсюджені під час проектування систем подачі та розподілу води рішення з точки зору енергетичної ефективності. Наведено стислий опис обладнання, необхідного для перетворення частоти обертів двигунів. Представлені техніко-економічні показники ефективності реконструкції красноармійської водопровідної насосної станції із застосуванням насосів з частотно-регульованими приводами.

**водопровідна насосна станція, дроселювання, частотно-регульований привод, економічна ефективність**

VITALY ROZHKOVA, DMITRIY ZAVOROTNYY  
ENERGY-EFFICIENT SOLUTIONS IN THE SUPPLY SYSTEM AND WATER  
DISTRIBUTION

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

In the design of distributed systems of water supply and distribution solutions in terms of energy efficiency have been considered. A brief description of the equipment needed to convert the engine speed has been given. Technical and economic indicators of efficiency of reconstruction of krasnarmiysk water pumping station with the use of pumps with variable frequency drives have been given.

**water pumping stations, throttling, variable frequency drive, the cost effectiveness**

**Рожков Віталій Сергійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри водопостачання, водовідведення і охорони водних ресурсів Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: оборотне водопостачання, системи комп'ютерного моделювання біологічних процесів.

**Заворотний Дмитро Вікторович** – асистент кафедри водопостачання, водовідведення і охорони водних ресурсів Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: оптимізація розрахунків та улаштування систем транспортування рідин.

**Рожков Виталий Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: оборотное водоснабжение, системы компьютерного моделирования биологических процессов.

**Заворотный Дмитрий Викторович** – ассистент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: оптимизация расчетов и устройства систем транспортировки жидкостей.

**Vitaly Rozhkov** – PhD (Eng.), Assistant Professor, Water Supply, Water Disposal and Water Resources Conservation and Protection Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: water recycling, computer modeling of biological processes.

**Dmitriy Zavorotnyy** – Assistant, Water Supply, Water Disposal and Water Resources Conservation and Protection Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: optimization of analysis and design of transporting system fluid.

УДК 620.92

**Н. В. ДОЛГОВ, А. А. ОЛЕКСЮК, В. М. ЛЕВИН, О. В. ШАЙХЕД**  
Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ИНДИВИДУАЛЬНОМ ТЕПЛОМ ПУНКТЕ С МНОГОКОНТУРНЫМ ТЕПЛООБМЕННЫМ АППАРАТОМ (МТА)**

Проведен анализ распределения потоков жидкости в тепловом пункте с многоконтурным теплообменным аппаратом. Предложена схема обвязки многоконтурных тепловых пунктов, с оптимальной металлоёмкостью. Разработана методика расчета оборудования теплового пункта для его оптимальной работы.

**индивидуальный тепловой пункт, змеевиковый теплообменник, тепловая сеть, горячее водоснабжение (ГВС), отопление, независимое присоединение, тепловой счетчик**

### **ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

В системах централизованного теплоснабжения в странах СНГ традиционно используется центральное качественное регулирование отпуска тепла. Это значит, что расход воды, циркулирующей в системе отопления (теплоноситель), остается неизменным в течение всего отопительного периода, а количество тепла, которое поставляется, регулируется теплоснабжающей организацией путем изменения ее температуры в соответствии с изменением температуры наружного воздуха на основе утвержденного температурного графика.

### **ЦЕЛЬ СТАТЬИ И ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Выявление факторов влияния на эффективность работы теплового пункта и распределение теплоносителя в трубопроводах и оборудовании. На базе метода контурных расходов получить зависимости расходов теплоносителя в независимых контурах отопления, горячего водоснабжения и контура источника теплоты.

### **ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА**

Исследование работы индивидуального теплового пункта подразумевает определение расходов, температур и давлений с целью определения корректной и стабильной работы насосов, балансировочной, термостатической арматуры и др.

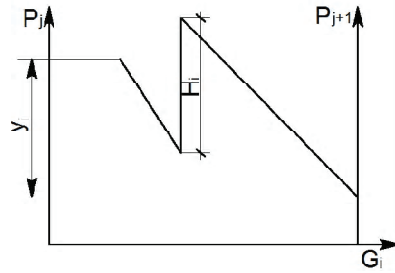
Рассмотрим произвольное циркуляционное кольцо теплового пункта с произвольным количеством участков  $d$ , узлов  $m$  и  $b$  линейных-неизвестных контуров. Будем считать, что для каждой ветви  $i = (j, j+1)$ , где  $j$  и  $j+1$  – ее начальный и конечный узлы, задан закон гидравлического сопротивления, связывающий общую потерю  $h_i$  давления на трение, перепад  $y_i$ . Тогда получаем зависимость

$$(m-1+b=d), \quad (1)$$

Изменение давления на участке с побудителем движения приведено на рис. 1.

На каждом участке действует закон квадратичного гидравлического сопротивления

$$\Delta p_i + H_i = \Delta P G_i^2. \quad (2)$$



**Рисунок 1** – Изменение давления на участке с побудителем движения:  $G_i$  – расход теплоносителя,  $\Delta P$  – сопротивление участка,  $H_i$  – активный напор,  $\Delta p$  – напор, равный разности пьезометрических отметок на концах участков.

Однако по знаку величины  $G_i$  необходимо судить о направлении потока. В работах академика В. Я. Хасилева вводятся векторные обозначения и диагональные матрицы  $\Delta \vec{p}$ ,  $\vec{G}$ ,  $\vec{H}$ ,  $A$  и  $B$ , тогда тепловой пункт в целом описывает уравнение, относящееся к каждому участку ( $i = 1, \dots, n$ )

$$\Delta \vec{p} + \vec{H} = A \cdot B \cdot \vec{G}, \quad (3)$$

где  $\Delta \vec{p}$  – вектор искомых потерь давления на участке;  
 $\vec{H}$  – вектор известных перепадов давления, создаваемых циркуляционными, смесительными насосами на участках ИТП;  
 $A$  – диагональная матрица характеристик гидравлического сопротивления всех участков ИТП от ( $i = 1$ ) до ( $i = n$ );  
 $B$  – диагональная матрица расходов теплоносителя всех участков теплового пункта от ( $i = 1$ ) до ( $i = n$ );  
 $\vec{G}$  – вектор расходов на искомых участках ИТП.

Для любого потокораспределения должны выполняться два сетевых закона Кирхгофа. В первом законе в каждом узле будет соблюдаться математический баланс

$$\sum_j G_j = G_j, j = 1, \dots, m, \quad (4)$$

где  $\sum G_j$  – алгебраическая сумма по всем участкам, имеющая общий участок  $j$ , потребитель тепловой энергии  $G_i > 0$ , источник тепловой энергии  $G_i < 0$ , если это разветвление  $G_i = 0$ .

Для ИТП должны быть заданы значения таким образом, чтобы имел место их общий нулевой баланс по всем узлам  $m$

$$\sum_{j=1}^m G_j = 0; G_a = -\sum_{j=1}^{a-1} G_i. \quad (5)$$

С использованием матрицы соединений  $A$ , которая однозначно отображает топологию схемы ИТП [1, 2], фиксируя соединение всех ее  $d$  участков и  $(a-1)$  неизменных узлов, балансы уравнения (4) для всей системы запишем в виде

$$A \vec{G} = \vec{G}_{yp}, \quad (6)$$

где  $\vec{G}_{yp}$  – вектор отдельных узловых расходов в отдельных узлах ИТП.

Второй сетевой расход требует нулевого суммарного изменения потерь давления  $\Delta p_i$  для любого гидравлического контура

$$\sum c \Delta p_i = 0. \quad (7)$$

Применимо для любого независимого контура ( $c = 1, \dots, k$ ) выбранной системы независимого подключения ИТП. Применяя матрицу  $B$ , получаем сокращение закона Кирхгофа

$$B \Delta p = 0, \quad (8)$$

где  $B$  – матрица совпадения мест обходов контуров.

Одна из искомым математических моделей сводится к системе уравнений

$$A\vec{G} = \vec{G}_{yp}, B\Delta p_p = 0, \Delta\vec{p} + \vec{H} = \Delta P \cdot G \cdot \vec{G}. \quad (9)$$

Уравнение (3), составляющее последнюю группу из  $d$  уравнений, называется замыкающим соотношением – оно дополняет  $(m - 1)$  уравнений первого закона и  $k$  уравнений второго закона Кирхгофа до полной системы (9) из  $2d$  уравнений относительно  $2d$  неизвестных  $\vec{G}$  и  $\Delta\vec{p}$ .

В этой системе можно исключить вектор  $\Delta\vec{p}$  путем подстановки (3) в (8)

$$AG = G. \quad (10)$$

Для определения степени открытия регулирующей арматуры в математическую модель должна быть введена матрица  $E$ , которая будет учитывать степень открытия балансировочной и регулирующей арматуры. После введения дополнительной матрицы она будет иметь вид

$$B \cdot \Delta P \cdot G \cdot E = B\vec{H}. \quad (11)$$

#### Расчет потоков распределения на ИТП на основе метода контурного расхода

Метод контурных расходов (МКР) – аналог известного метода контурных токов для расчета линейных электрических цепей в сочетании с методом Ньютона [5] для решения системы нелинейных алгебраических уравнений.

Для рассматриваемой схемы теплоснабжения строится оргграф схема. При построении этой системы, как правило, выбирают одну из систем контуров:

- 1) на схеме выделяется дерево, связывающее все ее  $d - 19$  узлов, в результате все участки разбиваются на  $a - 16$  участков дерева и  $k - 4$  участков, не входящих в это дерево, которые назовем хордами;
- 2) каждая хорда замыкает какую-то последовательность участков дерева и определяет контур, который и фиксируется соответствующей строкой в матрице  $B$ ;
- 3) матрицы и векторы цепи «расщепляются» на матрицы и векторы хорд  $(A_x, B_x, g_x, \Delta p_x, H_x)$  и дерева  $(A_d, B_d, g_d, \Delta p_d, H_d)$ .

Принципиальная схема индивидуального пункта представлена на рис. 2.

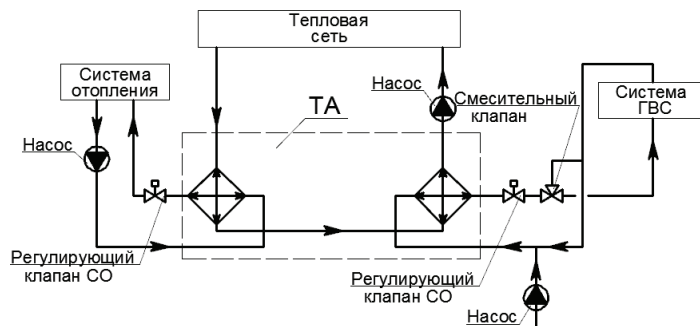


Рисунок 2 – Принципиальная схема индивидуального теплового пункта.

Формируется из выбранной принципиальной схемы теплового пункта схема дерева (рис. 3). Участки, не вошедшие в дерево, становятся хордами 1, 2, 3, 4 и их номера приняты совпадающими с номерами контуров  $d = 1, 2, 3, 4$  – хорды;  $d = 5, 6, 7, \dots, 20$  – дерево; направления обходов  $s = 1, 2, 3, 4$ ;  $j = 1, \dots, 20$  – узлы. В качестве линейно независимых приняты первые 18 узлов.

В трехконтурном теплообменном аппарате процессы передачи теплоты обусловлены взаимодействием тепловых потоков, направленных от греющего теплоносителя (воды тепловой сети) к нагреваемым теплоносителям (горячее водоснабжение и отопление). Процесс передачи теплоты в теплообменном аппарате характеризуется уравнением Ньютона-Рихмана, которое описывает передачу теплоты через твердую стенку с учетом коэффициентов теплоотдачи и тепловосприятости.

Количество теплоты, передаваемое на границы площадью  $F$  за время  $\tau$ , пропорционально температурному напору

$$\bar{Q} = \alpha \cdot \Delta t \cdot F \cdot \tau, \quad (12)$$

где  $\alpha$  – количество теплоты, отдаваемое с  $1 \text{ м}^2$  поверхности за единицу времени при единичном температурном напоре.

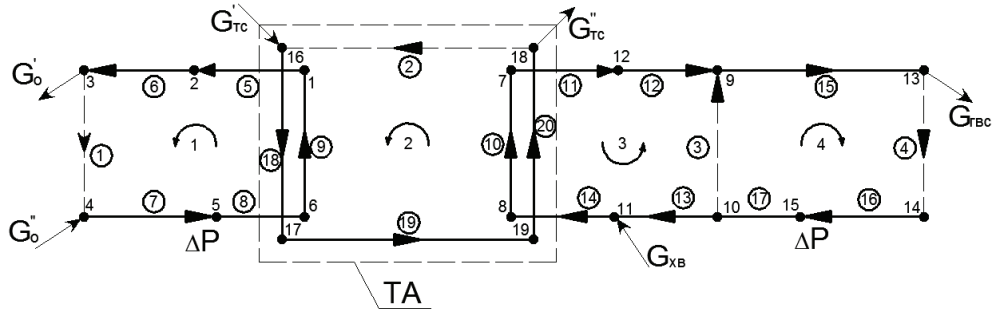


Рисунок 3 – Эквивалентная схема ИТП, оргграф схема.

С другой стороны, количество передаваемой теплоты зависит от характеристик потока теплоносителя [3, 4]

$$Q_i = c \cdot G_i (t_i^1 - t_i^2), \quad (13)$$

где  $c$  – удельная массовая теплоемкость теплоносителя при данной температуре, Дж/(кг·°C);  
 $G$  – расход теплоносителя в  $i$ -м контуре, кг/с;  
 $t_i^1$  – температура в подающем трубопроводе  $i$ -го контура теплоносителя, °C;  
 $t_i^2$  – температура в обратном трубопроводе  $i$ -го контура теплоносителя, °C.

Поскольку для математического моделирования потоков теплоты необходимо в комплексе учитывать тепловую мощность систем как теплоснабжения, так и отопления и горячего водоснабжения, то описывать работу систем в целом будет система уравнений (14)

$$\begin{cases} Q_{TC} = c \cdot G_{TC} (t_{TC}^1 - t_{TC}^2) \\ Q_o = c \cdot G_o (t_o^1 - t_o^2) \\ Q_{GBC} = c \cdot G_{GBC} (t_{GBC}^1 - t_{GBC}^2) \end{cases}. \quad (14)$$

В силу того, что в данном случае рассматривается количественное регулирование систем теплоснабжения, то определяющим фактором, рассматриваемым в качестве регулируемого, будет расход теплоносителя. Тогда система уравнений (14) примет вид (15).

$$\begin{cases} G_{TC} = \frac{Q_{TC}}{c \cdot (t_{TC}^1 - t_{TC}^2)} \\ G_o = \frac{Q_o}{c \cdot (t_o^1 - t_o^2)} \\ G_{GBC} = \frac{Q_{GBC}}{c \cdot (t_{GBC}^1 - t_{GBC}^2)} \end{cases}. \quad (15)$$

Нумерация участков произведена таким образом, что первые номера присвоены хордам  $Q_x = (G_1 \dots G_k)^T$ ,  $Q_n = (G_{k+1} \dots G_n)^T$ , а номера контуров и направления их обхода совпадают с номерами и ориентацией хорд. В таком случае,  $A = (A_x, A_n)$ , а  $B = (B_x, B_n)$ , где  $E$  – единичная матрица порядка  $k$ ,  $t$  – знак транспортирования.

Схема дерева рассматриваемого ИТП и система контуров принятого ИТП представлены на рис. 4, 5.

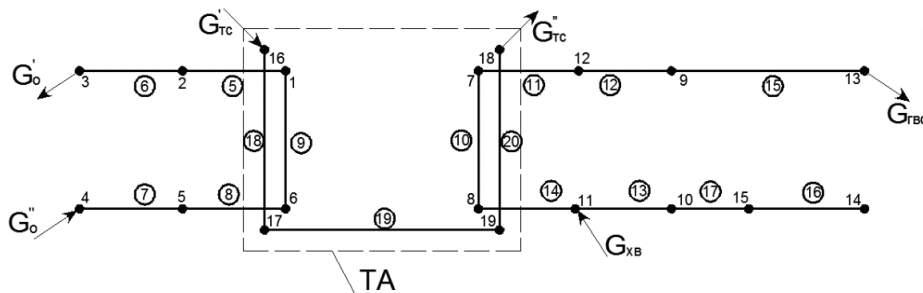


Рисунок 4 – Схема дерева рассматриваемого ИТП.

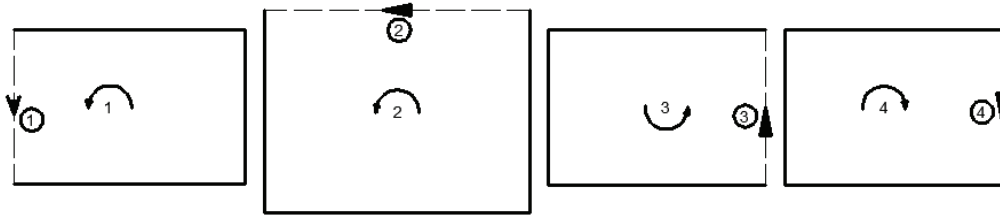


Рисунок 5 – Система контуров принятого ИТП.

По выбранному варианту дерева формируется система независимых контуров, число которых равно  $k = b - m + 1$ .

Выбирается направление обходов контуров, совпадающее с предварительно принятым направлением хорд, стрелки для контуров отвечают выбранным направлениям их обхода.

Эквивалентная математическая модель потокораспределения опирается на использование в качестве основных переменных, помимо расходов  $g_i$  и напоров  $\Delta p_i$ , также и узловых давлений  $p_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ), составляющих вместе с заданными давлениями  $p_m$  вектор  $\vec{p}$ . Соответствующая ей система уравнений не требует обращения к контурам, так как при любом  $\vec{p}$  уравнения второго закона Кирхгофа обращаются в тождества, при этом связь между напором  $h_i$  и этими давлениями на участках  $i = (j, j+1)$  будет иметь вид

$$\Delta p_i = p_i - p_{j+1}. \quad (16)$$

Строим матрицу соединений  $A$ , фиксирующую схему цепи:

$i$	$i$																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	+	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	-	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0
9	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	-	0	0	0	0	0
10	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	+	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	-	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	-	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0
14	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	-	0	0	0
16	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	-	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	-

Так как полная матрица  $\bar{A}$  соединений узлов и участков схемы будет содержать информацию о конечных узлах данного участка и его ориентации, то последовательным умножением этих столбцов на один и тот же вектор  $\vec{p}$  получаем уравнение (17) для всех участков, которое можно записать

$$A_{\bar{G}} = \bar{A}_{yp}; \Delta p = -\bar{A}' \vec{p} + H = -\Delta P G_i, \quad (17)$$

и будет состоять из  $m - 1 + 2b$  уравнений относительно векторов  $x$ ,  $h$ , и  $m - 1$  значений  $p_i$  для линейно независимых узлов. Также уравнение (17) можно сократить

$$A_{\bar{G}} = \bar{G}_{yp}; h = \bar{D}' \vec{p} + S G_i = H. \quad (18)$$

Формируются вектора узловых расходов в цепи

$$\vec{G} = (0, 0, G_3, -G_4, 0, 0, 0, 0, -G_9, G_{10}, G_{11}, 0, -G_{13}, 0, 0, -G_{16}, 0, 0)^T,$$

присваивая потребителю знак «-», источнику «+», а там, где водоразбор не осуществляется присваивается знак «0».

Формируются векторы действующих напоров по всем участкам теплового пункта

$$\Delta \vec{P} = (0, 0, 0, 0, \Delta P_5, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, \Delta P_{15}, 0, 0, 0, 0)^T,$$

ветки, где установлены насосы, обозначаются « $\Delta P$ », а пассивные ветки обозначаются знаком «0».



Далее для определения гидравлических сопротивлений на участках ИТП и расходов составляются диагональные матрицы.

$$G = \begin{pmatrix} g_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & g_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & g_{20} \end{pmatrix} \Delta P = \begin{pmatrix} \Delta p_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \Delta p_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \Delta p_{20} \end{pmatrix}.$$

Определяемое распределение потоков определяется векторами расходов

$$\vec{G} = (G_1, G_2, G_3 \dots G_{20})^T.$$

и гидравлических напоров

$$\Delta \vec{P} = (\Delta p_1, \Delta p_2, \Delta p_3 \dots \Delta p_{20})^T.$$

Для данного дерева ИТП и соответствующей ему хордовой системы контуров составляем матрицу  $B$  совпадающих участков и контуров

$c$	$i$																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	22	23	24
1	+	0	0	0	+	+	+	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	+
3	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	+	0	0	0

Числа в строке означают: «0» – отсутствие участка на  $i$ -м контуре, «+» – совпадение, а «-1» – несовпадение принятого направления движения на участке с принятым направлением обхода.

В каждом столбце матрицы не более двух нулевых элементов «-» или «+», а это значит; в определенный узел входит не более чем два контура, что является признаком плоской схемы. После построения матриц  $B$ ,  $G$ ,  $\Delta P$  запишем производную трех матриц:

$BGAP$	$G_1 s_1 $	0	0	0	$G_2 s_2 $	$G_3 s_3 $	$G_4 s_4 $	$G_5 s_5 $	$G_6 s_6 $	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	$G_2 s_2 $	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$G_{18} s_{18} $	$G_{19} s_{19} $	$G_{20} s_{20} $	0
	0	0	$G_3 s_3 $	0	0	0	0	0	0	$-G_{10} s_{10} $	$-G_{11} s_{11} $	$-G_{12} s_{12} $	$-G_{13} s_{13} $	$-G_{14} s_{14} $	0	0	0	0	0
	0	0	$G_4 s_4 $	$G_5 s_5 $	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$G_{15} s_{15} $	$G_{16} s_{16} $	$G_{17} s_{17} $	0	0

Составим систему уравнений исходя из матриц  $A$  и  $BGAP$ , решение которых является коэффициентами системы уравнений (10, 11), относительно

$$\left\{ \begin{array}{l} -g_5 + g_9 = 0 \\ g_5 - g_6 = 0 \\ -g_1 + g_6 = G_3 \\ g_1 - g_7 = -G_4 \\ g_7 - g_8 = 0 \\ g_8 + g_9 = 0 \\ g_{10} - g_{11} = 0 \\ -g_{11} + g_{12} = 0 \\ g_3 + g_{12} = -G_9 \\ -g_3 - g_{13} + g_{17} = G_{10} \\ -g_{13} + g_{14} = G_{11} \\ -g_4 + g_{15} = G_{12} \\ g_4 - g_{16} = 0 \\ g_{16} - g_{17} = 0 \\ -g_2 - g_{21} = -G_{15} \\ g_{21} - g_{22} = 0 \\ g_{22} - g_{23} = 0 \end{array} \right. \quad (19)$$

$$\begin{cases} G_1\Delta P_1^2 + G_5\Delta P_5^2 + G_6\Delta P_6^2 + G_7\Delta P_7^2 + G_8\Delta P_8^2 + G_9\Delta P_9^2 = -H \\ G_2\Delta P_2^2 + G_{21}\Delta P_{21}^2 + G_{22}\Delta P_{22}^2 + G_{23}\Delta P_{23}^2 = 0 \\ G_3\Delta P_3^2 - G_{10}\Delta P_{10}^2 - G_{11}\Delta P_{11}^2 - G_{12}\Delta P_{12}^2 - G_{13}\Delta P_{13}^2 - G_{14}\Delta P_{14}^2 = 0 \\ G_3\Delta P_3^2 + G_4\Delta P_4^2 + G_{15}\Delta P_{15}^2 + G_{16}\Delta P_{16}^2 + G_{17}\Delta P_{17}^2 = -H \end{cases} \quad (20)$$

## ВЫВОД

В результате математического моделирования получена зависимость контурных расходов в оборудовании индивидуального теплового пункта с многоконтурными теплообменными аппаратами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хасилев, В. Я. Линейные и линеаризованные преобразования схем гидравлических цепей [Текст] / В. Я. Хасилев // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – М. : Наука, 1964. – № 2. – С. 231–243.
2. Хасилев, В. Я. О выборе диаметров труб разветвленных тепловых сетей с использованием ЭВМ [Текст] / В. Я. Хасилев, А. П. Меренков, С. В. Сумароков // Теплоэнергетика. – М. : Наука, 1966. – № 6. – С. 60–65.
3. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача [Текст] / В. В. Нащокин. – М. : Высшая школа, 1980. – 469 с.
4. Краснощеков, Е. А. Задачник по теплопередаче [Текст] : [Учеб. пособие для ВУЗов] / Е. А. Краснощеков, А. С. Сукомел. – 4-е изд., перераб. – М. : Энергия, 1980. – 288 с.
5. Демидович, Б. П. Основы вычисления математики [Текст] / Б. П. Демидович, И. А. Марон. – М. : Наука, 1970. – 664 с.
6. Gross, Jonatan L. Graph Theory and Its Applications [Текст] / Jonatan L. Gross, Jay Yellen. – NewWork : CRC Press, 2011. – 779 p.

Получено 11.09.2014

М. В. ДОЛГОВ, А. О. ОЛЕКСЮК, В. М. ЛЕВИН, О. В. ШАЙХЕД  
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОТОКОРОЗПОДІЛЕННЯ В  
ІНДИВІДУАЛЬНОМУ ТЕПЛОВОМУ ПУНКТІ З БАГАТОКОНТУРНИМ  
ТЕПЛООБМІННИМ АПАРАТОМ (МТА)

Донбаська національна академія будівництва і архітектури

Проведено аналіз розподілу потоків рідини в тепловому пункті з багатоконтурним теплообмінним апаратом. Запропоновано схему обв'язки багатоконтурних теплових пунктів, з оптимальною металомісткістю. Розроблено методику розрахунку обладнання теплового пункту для його оптимальної роботи.

**індивідуальний тепловий пункт, змієвиковий теплообмінник, тепла мережа, гаряче водопостачання (ГВП), опалення, незалежне приєднання, тепловий лічильник**

NYKOLAY DOLGOV, ANATOLIY OLEKSYUK, VIKTOR LEVIN, OLGA SHAYHED  
A MATHEMATICAL MODEL OF THE FLOW DISTRIBUTION IN THE  
INDIVIDUAL HEATING UNITS WITH MULTI-LOOP HEAT EXCHANGER (AIT)  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

The analysis of the distribution of fluid flow in the thermal point with multi-loop heat exchanger has been carried out. A scheme of multiple-tying heat points, with optimum metal content has been suggested. The method of calculation of thermal equipment item for optimum performance has been developed.

**individual heater, coil heat exchangers, thermal network, domestic hot water (DHW) heating, independent affiliation, heat meter**

Долгов Микола Вікторович – викладач кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: енергоресурсозбереження в системах теплопостачання.

**Олексюк Анатолій Олексійович** – доктор технічних наук, професор кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: енергоресурсозбереження в системах теплопостачання за допомогою індивідуальних теплових пунктів, електрокалориферів з високотемпературними електродами, опалювальні доводчики.

**Левін Віктор Матвійович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри вищої і прикладної математики та інформатики Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: дослідження нестационарних неоднорідних нелінійних математичних моделей механіки деформівного твердого тіла.

**Шайхед Ольга Володимирівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: енергоресурсозбереження в системах теплопостачання.

**Долгов Николай Викторович** – преподаватель кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: энергоресурсосбережение в системах теплоснабжения.

**Олексюк Анатолій Алексеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: энергоресурсосбережение в системах теплоснабжения с помощью индивидуальных тепловых пунктов, электрокалориферов с высокотемпературными электродами, отопительных доводчиков.

**Левин Виктор Матвеевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей и прикладной математики и информатики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: исследование нестационарных неоднородных нелинейных математических моделей механики деформируемого твердого тела.

**Шайхед Ольга Владимировна** – кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: энергоресурсосбережение в системах теплоснабжения.

**Dolgov Nikolay** – Assistant lecturer, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interest: saving of energy resources in systems of heat Supplying.

**Oleksyuk Anatoliy** – DSc (Eng.), Professor, 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.

**Levin Viktor** – DSc (Eng.), Professor, the Head of the Higher and Applied Mathematics and Computer Science Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: study of unsteady inhomogeneous nonlinear mathematical models of mechanics of deformable rigid bodies.

**Shayhed Olga** – PhD (Eng.), Associate Professor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: energy resource saving in heating systems.

УДК 697.35

**О. Н. ЗАЙЦЕВ<sup>а</sup>, Л. В. ПЕТРЕКЕВИЧ<sup>б</sup>, Т. Д. ТРИКОЛИЧ<sup>с</sup>**

<sup>а</sup> Национальная академия природоохранного и курортного строительства, <sup>б</sup> Одесский национальный политехнический университет, <sup>с</sup> Одесская государственная академия строительства и архитектуры

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМ ВОДЯНОГО ОТОПЛЕНИЯ С КОМБИНИРОВАННЫМИ НАГРЕВАТЕЛЬНЫМИ ПРИБОРАМИ**

Постоянное увеличение стоимости энергоресурсов обусловлено уменьшением запасов ископаемого топлива. Особенно ощутимо это для Украины. Около 40 % суммарного энергопотребления экономики нашей страны приходится на затраты энергии в жилищно-коммунальном хозяйстве, что значительно превышает аналогичный показатель в европейских странах. Таким образом, снижение энергозатрат на отопление в жилищно-коммунальном хозяйстве представляет собой важную задачу, как для всей страны, так и для каждого потребителя тепла в отдельности. Приведённые расчеты позволяют сделать вывод о целесообразности применения низкотемпературного отопления с точки зрения сокращения расхода тепла на подогрев вентиляционного воздуха. В помещениях со значительной долей теплопотерь с отработанным вентиляционным воздухом эффект от такого решения может достигнуть 20 %.

**энергозатраты, конденсационный котел, солнечный коллектор, тепловой насос, термическое сопротивление, низкотемпературное отопление**

### **ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ И АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ**

Уменьшение запасов ископаемого топлива приводит к их постоянному удорожанию. Особенно ощутимо это для Украины, так как доля затрат энергии в жилищно-коммунальном хозяйстве нашей страны составляет около 40 % суммарного энергопотребления экономики, что значительно превышает аналогичный показатель в европейских странах [1]. Таким образом, снижение энергозатрат на отопление помещений представляет собой важную задачу, как для всей страны, так и для каждого потребителя тепла в отдельности. Достигнуть этого можно следующими известными способами:

- повышением эффективности работы существующего энергетического оборудования;
- применением нового экономного оборудования, такого как конденсационные котлы, тепловые насосы, солнечные коллекторы;
- увеличением термического сопротивления ограждающих конструкций зданий;
- утилизацией тепла отработанного вентиляционного воздуха;
- регулированием теплового потока отопительных приборов и, следовательно, производительности генератора тепла.

На наш взгляд, существует еще один эффективный способ снижения энергопотребления отопительных систем. Он связан с применением низкотемпературного лучистого отопления, которое позволяет использовать низкопотенциальное тепло окружающей среды с помощью специальных устройств (тепловых насосов, солнечных коллекторов, конденсационных котлов и т. д.) [2–5].

**Целью настоящей работы** является повышение эффективности применения систем водяного отопления за счет применения радиационных нагревательных приборов.

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОТОПЛЕНИЯ В ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЯХ**

Нагревательные приборы в таких системах имеют развитую площадь поверхности и температуру, ограниченную нормативными документами. Так, СНиП 2.04.05-91\* предусматривает следующие

© О. Н. Зайцев, Л. В. Петрекевич, Т. Д. Триколич, 2014

ограничения температуры поверхности для строительных конструкций со встроенными нагревательными элементами:

- 26 °С – для полов помещений с постоянным пребыванием людей;
- 30 °С – для обходных дорожек, скамей плавательных бассейнов;
- 31 °С – для полов помещений с временным пребыванием людей;
- 28, 30, 33, 36, 38 °С для потолков при высоте помещения, не превышающей соответственно 2,8; 3,0; 3,5; 4,0 и 6,0 м [6].

Таким образом, средняя радиационная температура поверхностей  $t_R$ , обращенных в помещение, может значительно превышать таковую при конвективном отоплении. Следовательно, температура воздуха  $t_B$  в таком помещении может быть понижена согласно графической зависимости, известной как первое условие комфортности [7]:

Как видно из рисунка 1, при  $t_R = 19$  °С достаточно поддерживать температуру воздуха  $t_B = 18$  °С, при  $t_R = 20$  °С  $t_B = 16$  °С, при  $t_R = 21$  °С,  $t_B = 14$  °С. Возможная экономия энергии  $\Delta Q$ , %, для подогрева вентиляционного воздуха составит в расчете на 1 м<sup>3</sup>/ч.

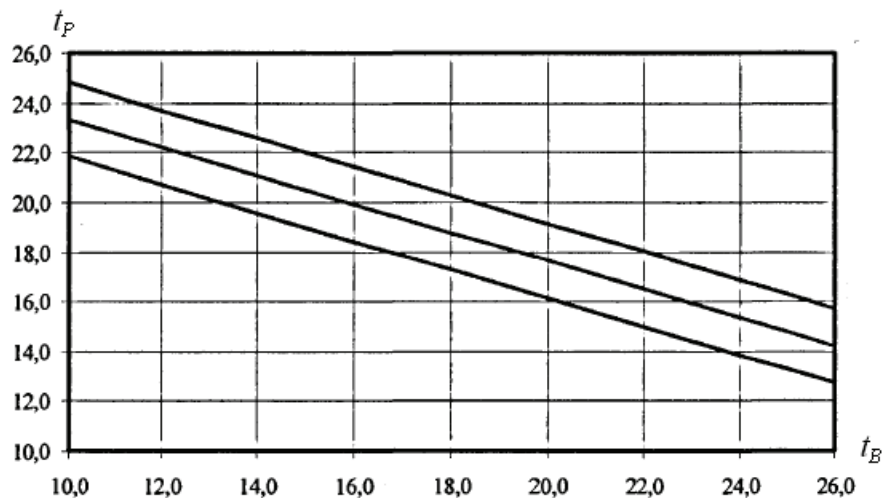


Рисунок 1 – Диаграмма теплового комфорта.

$$\Delta Q = \frac{Q_{\text{тк}} - Q_{\text{тл}}}{Q_{\text{тк}}},$$

$$Q_{\text{тк}} = mc\Delta t = mc(t_{\text{БК}} - t_{\text{Н}});$$

$$Q_{\text{тл}} = mc\Delta t = mc(t_{\text{БЛ}} - t_{\text{Н}});$$

$$\Delta Q = \frac{Q_{\text{тк}} - Q_{\text{тл}}}{Q_{\text{тк}}} = \frac{t_{\text{БК}} - t_{\text{БЛ}}}{t_{\text{БК}} - t_{\text{Н}}},$$

где  $t_{\text{БК}}$  – температура воздуха в помещении при конвективном отоплении, принята равной 20 °С;  
 $t_{\text{БЛ}}$  – температура воздуха в помещении при лучистом отоплении;  
 $Q_{\text{тк}}$  – количество теплоты, необходимой для подогрева наружного воздуха до температуры  $t_{\text{БК}}$ ;  
 $Q_{\text{тл}}$  – количество теплоты, необходимой для подогрева наружного воздуха до температуры  $t_{\text{БЛ}}$ ;  
 $m$  – расход вентиляционного воздуха,  
 $c$  – изобарная теплоемкость воздуха,  
 $t_{\text{Н}} = -18$  °С – расчетная температура наружного воздуха для г. Одессы [6].

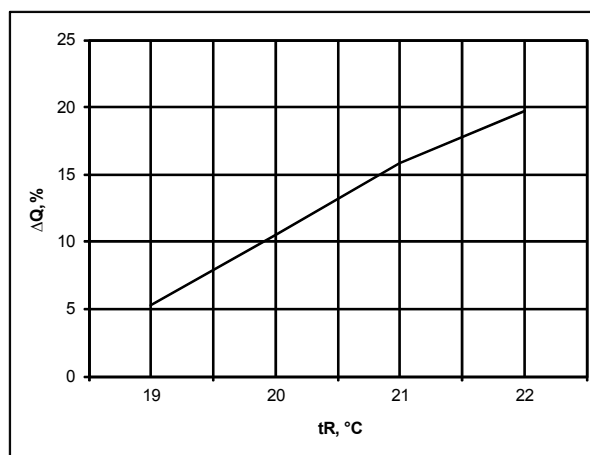
Численные значения  $\Delta Q$  представлены в таблице 1.

По результатам расчетов построен следующий график зависимости  $\Delta Q$  от  $t_R$  (рис. 2):

Примем, что средняя радиационная температура помещения поддерживается на уровне  $t_R = 21$  °С. Тогда при доле вентиляции в суммарных тепловых потерях помещения  $\Delta Q_B$ , %, возможная экономия энергии для обогрева помещения  $\Delta Q_{\text{II}}$ , %, составит (табл. 2).

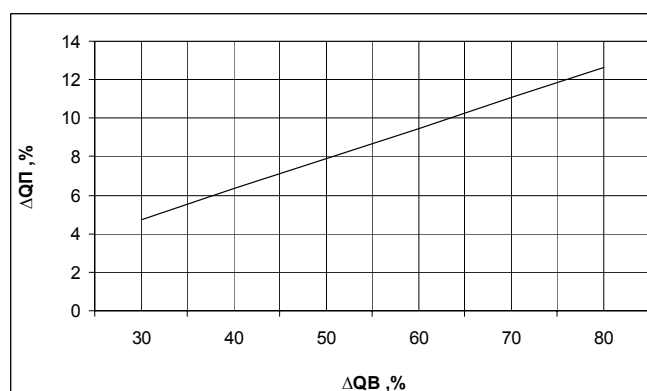
**Таблица 1** – Возможная экономия энергии для подогрева вентиляционного воздуха при снижении температуры внутреннего воздуха и температуре наружного воздуха  $t_H = -18^\circ\text{C}$ .

$t_R, ^\circ\text{C}$	19	20	21	22
$t_{BK}, ^\circ\text{C}$	20	20	20	20
$t_{BL}, ^\circ\text{C}$	18	16	14	12,5
$\Delta Q, \%$	5,3	10,5	15,8	19,7

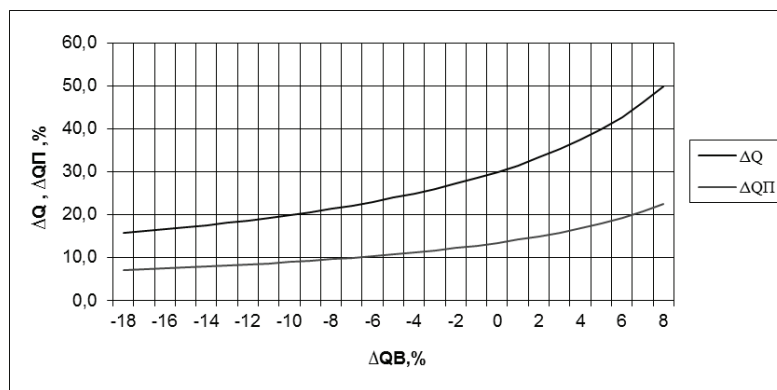
**Рисунок 2** – Зависимость  $\Delta Q, \%$  от  $t_R$ .**Таблица 2** – Возможная экономия энергии для отопления помещения при снижении температуры внутреннего воздуха и наружной температуре  $t_H = -18^\circ\text{C}$ 

$\Delta Q, \%$	15,8	15,8	15,8	15,8	15,8	15,8
$\Delta Q_B, \%$	30	40	50	60	70	80
$\Delta Q_{II}, \%$	4,7	6,3	7,9	9,5	11,1	12,6

По результатам расчетов построен график зависимости  $\Delta Q_{II}, \%$  от  $\Delta Q_B, \%$  (рис. 3):

**Рисунок 3** – Зависимость возможной экономии энергии для отопления помещения  $\Delta Q_{II}, \%$  от доли потерь тепла на нагревание вентиляционного воздуха в суммарных тепловых потерях помещения  $\Delta Q_B, \%$ .

Поскольку температура наружного воздуха изменяется в течение отопительного периода (в нашем случае от  $-18$  до  $8^\circ\text{C}$ ), рассмотрим влияние этого изменения на величину экономии тепла в системе отопления помещения. Примем, что тепловые потери с вентиляционным воздухом составляют 45 % от суммарных потерь тепла [8]. Тогда при средней радиационной температуре внутренних поверхностей  $t_R = 21^\circ\text{C}$  экономия энергии на подогрев свежего воздуха  $\Delta Q, \%$  и, следовательно, на обогрев помещения  $\Delta Q_{II}, \%$ , составит (рис. 4).



**Рисунок 4** – Зависимость возможной экономии энергии для нагрева свежего воздуха  $\Delta Q$ , % и отопления помещения  $\Delta Q_{\text{П}}$ , % от доли потерь тепла на вентиляцию  $\Delta Q_{\text{В}}$ , %.

## ВЫВОДЫ

Как видно из графиков, можно сделать вывод о целесообразности применения низкотемпературного отопления с точки зрения сокращения расхода тепла на подогрев вентиляционного воздуха. В помещениях со значительной долей теплопотерь с отработанным вентиляционным воздухом эффект от такого решения может достигнуть 20 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ путей уменьшения энергозатрат за счет периодического снижения температуры воздуха отапливаемых помещений [Текст] / П. Г. Круковский, О. Ю. Тадля, М. А. Метель, Г. А. Пархоменко // Пром. Теплотехника. – 2008. – Т. 30, № 2. – С. 79.
2. Зайцев, О. Н. Проектирование систем водяного отопления [Текст] : пособие для проектировщиков, инженеров и студентов технических ВУЗов / О. Н. Зайцев, А. П. Любарец. – Вена ; Одесса ; Киев : [б. и.], 2008. – 200 с.
3. Довмир, Н. М. Низкотемпературные режимы систем отопления как предпосылка эффективного применения конденсационных котлов и тепловых насосов [Текст] / Н. М. Довмир // Пром. Теплотехника. – 2008. – № 5. – С. 62–68.
4. Долинский, А. А. Тепловые насосы в системе теплоснабжения зданий [Текст] / А. А. Долинский, Б. Х. Драганов // Пром. Теплотехника. – 2008. – № 6. – С. 71–83.
5. Накорчевский, А. И. Система теплоснабжения теплоавтономного дома [Текст] / А. И. Накорчевский // Пром. Теплотехника. – 2009. – № 1. – С. 67–73.
6. СНиП 2.04.05-91\*. Отопление, вентиляция и кондиционирование [Текст]. – Взамен СНиП 2.04.05-86 ; введ. 1992-01-01. – М. : ГУП ЦПП, 1997. – 76 с.
7. Богословский, В. Н. Теплообмен в помещении с панельно-лучистой системой обогрева [Текст] / В. Н. Богословский // Водоснабжение и санитарная техника. – 1961. – № 9. – С. 23–28.
8. Гершкович, В.Ф. Энергосберегающие системы жилых зданий. Пособие по проектированию. Ч. 1 [Текст] / В. Ф. Гершкович // С.О.К. (Сантехника, отопление, кондиционирование) : Ежемесячный специализированный журнал. – 2006. – № 7. – С. 76–82.

Получено 12.09.2014

## О. М. ЗАЙЦЕВ <sup>а</sup>, Л. В. ПЕТРЕКЕВИЧ <sup>б</sup>, Т. Д. ТРИКОЛИЧ <sup>с</sup> ВДОСКОНАЛЕННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ СИСТЕМ ВОДЯНОГО ОПАЛЕННЯ З КОМБІНОВАНИМИ НАГРІВАЛЬНИМИ ПРИБОРАМИ

<sup>а</sup> Національна академія природоохоронного та курортного будівництва, <sup>б</sup> Одеський національний політехнічний університет, <sup>с</sup> Одеська державна академія будівництва і архітектури

Постійне збільшення вартості енергоресурсів обумовлено зменшенням запасів викопного палива. Особливо відчутно це для України. Близько 40 сумарного енергоспоживання економіки нашої країни припадає на витрати енергії в житлово-комунальному господарстві, що значно перевищує аналогічний показник в європейських країнах. Таким чином, зниження енерговитрат на опалення в житлово-комунальному господарстві є важливою задачею як для всієї країни, так і для кожного споживача тепла окремо. Наведені розрахунки дозволяють зробити висновок про доцільність застосування

низькотемпературного опалення з точки зору скорочення витрат тепла на підігрів вентиляційного повітря. У приміщеннях із значною часткою тепловтрат з відпрацьованим вентиляційним повітрям ефект від такого рішення може досягти 20 %.

**еерговитрати, конденсаційний котел, сонячний колектор, тепловий насос, термічний опір, низькотемпературне опалення**

OLEG ZAITSEV <sup>a</sup>, VASILY NAKONECHNY <sup>b</sup>, LILY PETREKEVICH <sup>c</sup>  
ENERGY SAVING WITH LOW TEMPERATURE HEATING SYSTEMS

<sup>a</sup> National Academy of Environmental and Resort Construction, <sup>b</sup> Odessa National Polytechnic University, <sup>c</sup> Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

The constant increase in energy costs, which is caused by the decrease of fossil fuels. This is especially noticeable for Ukraine. About 40 % of the total energy consumption of the economy of our country lies in energy consumption in the residential sector, which is much higher than in Europe-American countries. Thus, the reduction of energy consumption for heating in the residential sector is an important task for the whole country and for each consumer individually heat. The given calculations suggest feasibility of using low-temperature heating in terms of reducing the flow of heat for heating the ventilation air. In areas with a significant portion of heat loss from the exhaust ventilation air effect of such a decision can reach 20 %.

**energy consumption, condensing boiler, solar panels, heat pump, heat resistance, low temperature heating**

**Зайцев Олег Миколайович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теплогазопостачання та вентиляції Національної академії природоохоронного і курортного будівництва. Академік Кримської академії наук, дійсний член академії будівництва України. Наукові інтереси: теплогенеруючі установки малої потужності, закручені потоки та їх взаємодія, вентиляція нестационарних місць зварювання в середовищі захисних газів, системи водяного опалення.

**Петрекевич Лілія Валеріївна** – магістр кафедри теоретичних основ хімії Одеського національного політехнічного університету. Інженер 1 категорії. Наукові інтереси: системи водяного опалення, альтернативні джерела теплової енергії.

**Триколич Тетяна Дмитрівна** – асистент кафедри опалення, вентиляції та охорони повітряного басейну Одеської державної академії будівництва та архітектури. Інженер. Наукові інтереси: закручені потоки та їх взаємодія, системи опалення напівзакритих і відкритих приміщень.

**Зайцев Олег Николаевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции Национальной академии природоохранного и курортного строительства. Академик Крымской академии наук, действительный член академии строительства Украины. Научные интересы: теплогенерирующие установки малой мощности, закрученные потоки и их взаимодействие, вентиляция нестационарных мест сварки в среде защитных газов, системы водяного отопления.

**Петрекевич Лилия Валериевна** – магистр кафедры теоретических основ химии Одесского национального политехнического университета. Инженер 1 категории. Научные интересы: системы водяного отопления, альтернативные источники тепловой энергии.

**Триколич Татьяна Дмитриевна** – ассистент кафедры отопления, вентиляции и охраны воздушного бассейна Одесской государственной академии строительства и архитектуры. Инженер. Научные интересы: закрученные потоки и их взаимодействие, системы отопления полузакрытых и открытых помещений.

**Oleg Zaitsev** – DSc (Eng.), Professor, Head of the Heat and Ventilation Department, National Academy of Nature Protection and Resort Development. Academician of Crimean Academy of Sciences, member of the Academy of Construction of Ukraine. Scientific interests: heat generating unit of small capacity, swirling flows and their interaction, ventilation unsteady places welding in shielding gases, water heating systems.

**Petrekevich Lily** – Master, Theoretical Foundations of Chemistry Department, Odessa National Polytechnic University. Engineer of the first category. Scientific interests: water heating systems, alternative sources of heat energy.

**Trykolych Tatiana** – Assistant, Heating, Ventilation and Air Protection Department, Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. Engineer. Scientific interests: swirling flows and their interaction, heating systems and semi-open spaces.



УДК 629.13

**О. М. НАЗАРЕНКО<sup>а</sup>, В. В. ПОПЛАВСЬКА<sup>б</sup>**

<sup>а</sup> Запорізька державна інженерна академія, <sup>б</sup> Департамент Житлового комунального господарства  
Запорізької МР

## **ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ РИНКУ ВОДНИХ РЕСУРСІВ**

Протягом тривалого часу досить поширеною була концепція «безплатності» водних ресурсів і тому питання про їх грошову оцінку навіть не поставало. Але розвиток економіки, який вимагав залучення все більшої кількості природних ресурсів, і призвів до їх дефіциту, примусив науковців змінити свої погляди стосовно дарів природи. Сьогодні вивчається можливість створення регіональних установ, які будуть створювати умови для формування ринку водних ресурсів.

**безоплатність, відповідальність, ресурси, плата, забруднення, штраф, скид, ліміт, чиста вода, попит**

### **ФОРМУЛЮВАННЯ ПРОБЛЕМИ**

За запасами водних ресурсів, доступними для користування, Україна належить до найменш забезпечених власними водними ресурсами європейських держав (в Україні питне водопостачання на  $\frac{2}{3}$  забезпечується за рахунок поверхневих вод). Напруженість водогосподарсько-екологічного становища в нашій країні зумовлена двома граничними умовами: з одного боку, низькою середньорічною водо-забезпеченістю – на одного мешканця припадає біля 1 тис. м куб. на рік, а це у 15 разів нижче за норму, визначену Європейською Економічною комісією ООН, і з іншого, майже катастрофічним якісним станом водних джерел. Поряд з цим водні ресурси використовуються нерационально, з порушенням екологічних вимог, що пов'язано з екстенсивним характером розвитку економіки країни, наявністю застарілих водо- та енергомістких технологій.

### **АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ**

У світовій практиці плата за спеціальне природокористування як економічний інструмент управління природокористуванням застосовується досить давно, а у вітчизняній – набула поширення тільки з початку 1990-х років, коли відповідні положення було вміщено в Законі «Про охорону навколишнього природного середовища» і розпочався процес перебудови економіки України на ринкових засадах. В екологічному законодавстві збір за спеціальне природокористування належить до основних принципів охорони навколишнього природного середовища (ст. 3 Закону «Про охорону навколишнього природного середовища»), визнається складовою екологічної політики держави і в цій якості має сприяти сталому розвитку шляхом узгодження економічних і екологічних інтересів суспільства.

### **ЦІЛЬ РОБОТИ**

Майбутній організаційно-економічний механізм використання водних ресурсів має поєднувати інструменти управління водокористуванням стимулювального та примусового характеру.

Ці інструменти дають змогу водокористувачам серед існуючої множини можливих стратегій обрати саме ту, яка відповідає їх критеріям водокористування. На відміну від примусового таке регулювання створює передумови для розвитку економіко-екологічних систем шляхом зміни їх стану на більш якісний.

## ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Вода відіграє подвійну роль в житті людства. З одного боку, вона є носієм життя, формуючи умови для відтворення, розвитку, існування усіх живих організмів, природного середовища в цілому, самої людини. З іншого, вода використовується як природна сировина, виступає елементом виробничих відносин, складовою технологічних процесів практично у всіх галузях господарської діяльності людини, у виробництві багатьох видів продукції. При цьому особливістю водних ресурсів є їх обмеженість.

Роль водного фактора у підтриманні балансу природно-екологічних процесів є однією з центральних. Будь-які зміни водного режиму і водозабезпеченості зумовлюють значний прямий і непрямий вплив як на функціонування природних екосистем, так і економіку країни. Досягнутий рівень розвитку економічної науки та суспільної свідомості визначають необхідність глибокого, комплексного осмислення принципів і ролі водних ресурсів для національної економіки, розробки адекватного сучасним умовам методичного інструментарію оцінки вартості водних об'єктів, технології створення та супроводження економічно та екологічно раціональної системи управління водним господарством.

Споживання свіжої води на одиницю виробленої продукції перевищує цей показник у порівнянні з Францією у 2,5 рази, Німеччиною – у 4,3, Великою Британією та Швецією – у 4,2 рази. Крім того, й показники середньодобового споживання води одним мешканцем в комунальному господарстві України значно вищі.

У світовій практиці плата за спеціальне природокористування як економічний інструмент управління природокористуванням застосовується досить давно, а у вітчизняній – набула поширення тільки з початку 1990-х років, коли відповідні положення було вміщено в Законі «Про охорону навколишнього природного середовища» і розпочався процес перебудови економіки України на ринкових засадах. В екологічному законодавстві збір за спеціальне природокористування належить до основних принципів охорони навколишнього природного середовища (ст. 3 Закону «Про охорону навколишнього природного середовища»), визнається складовою екологічної політики держави і в цій якості має сприяти сталому розвитку шляхом узгодження економічних і екологічних інтересів суспільства. У найзагальнішому вигляді роль плати за спеціальне природокористування як господарського інструменту управління полягає, зокрема, у стимулюванні раціонального використання природних ресурсів унаслідок економічного тиску на суб'єктів господарювання – користувачів цих ресурсів; формуванні екологічного світогляду.

Однією з головних причин негативних наслідків антропогенного впливу на водні об'єкти є споживацьке відношення до них. Вода як природний ресурс на відміну від нафти, газу, вугілля щороку відновлюється в процесі глобального водообміну. Тому водні ресурси довго вважалися невичерпними та здатними до самоочищення. Однак збільшення впливу на водні джерела та ландшафти водозбірних басейнів призвело до порушення умов формування стоку і водного режиму, зниження самовідновлюваної спроможності водних ресурсів. Це зумовило зменшення водності річок, зниження їх біопродуктивності.

Природне середовище і соціально-економічні системи невіддільні одне від одного. Захист чистого водного середовища, а також загроза дефіциту води потребують комплексного та раціонального підходу до використання водних ресурсів: це об'єктивна необхідність, яка впливає з умов соціально-економічного розвитку.

Обмеженість водних ресурсів, а також різноманітність напрямків їх господарського використання з неоднаковим ступенем ефективності передбачають необхідність реалізації виваженої тарифної політики. Рентна політика розглядається державою як спосіб вилучення частини абсолютних і додаткових доходів, отриманих від експлуатації водного об'єкта. При цьому попит на воду є нееластичним за ціною.

Системні властивості процесів управління водним господарством України дозволили сформулювати ряд методологічних постулатів, які спрямовані на удосконалення існуючих сьогодні організаційного та економічного механізмів водокористування:

1) гідрологічно, екологічно та економічно обґрунтована відокремленість водних ресурсів України повинна бути персоніфікована у водорозпорядників, які здійснюють оперативне управління на регіональному рівні;

2) соціальна і економічна відповідальність водокористувачів і водорозпорядників визначається цілями функціонування водного господарства України в цілому, реалізуються підходи «користувач платить», «забруднювач компенсує», «споживач визначає»;

3) організація регіональних внутрішніх ринкових механізмів визначення ціни на водні ресурси з урахуванням витрат на забір вод, витрат на експлуатацію водних об'єктів, витрат на доставку, співставлення альтернативних технологій задоволення попиту на воду в розрізі окремих споживачів та інших чинників;

4) дотримання однорідності та стабільності вимог (принципів) роботи з різними регіональними водорозпорядниками, а також функціонування водного сектора в цілому забезпечує цілість державної системи управління водним господарством, монополістичні регіональні ринки і конкурентне середовища на загальнодержавному рівні;

5) економічна оцінка стану та використання водних ресурсів України повинна базуватися на рентній концепції, яка реалізує результатний підхід і пов'язана з майбутнім періодом корисної експлуатації / використання водних ресурсів.

Майбутній організаційно-економічний механізм використання водних ресурсів має поєднувати інструменти управління водокористуванням стимулювального та примусового характеру.

До речі, на прийняття екологічно орієнтованих рішень у процесі господарської діяльності у розвинених країнах велику увагу приділяють інструментам стимулювального характеру. При ефективній масовій дії інструментів стимулювального характеру для всіх суб'єктів економіко-екологічної системи забезпечується мультиплікативний ефект. Ці інструменти дають змогу водокористувачам серед існуючої множини можливих стратегій обирати саме ту, яка відповідає їх критеріям водокористування. На відміну від примусового таке регулювання створює передумови для розвитку економіко-екологічних систем шляхом зміни їх стану на більш якісний.

Інструменти примусового характеру – це жорсткі регламентації діяльності водогосподарських суб'єктів. Вони забезпечують сталість параметрів економіко-екологічної системи або, іншими словами, зберігають її гомеостаз. Вплив таких інструментів носить переважно адміністративно-законодавчий характер. Примусова мотивація ґрунтується переважно на механізмі негативного зворотного зв'язку і спрямована на обмеження господарського впливу на водні екосистеми. Цільове призначення негативної мотивації, яка пов'язана, головним чином, з припасами, заборонами, обмеженнями, – збереження існуючої рівноваги водогосподарської системи. До економічних інструментів примусового характеру необхідно віднести:

- 1) збори за спеціальне водокористування, тобто за споживання води та скидання;
- 2) відміну дотацій на водокористування;
- 3) штрафи за скидання забруднених вод понад норму та економічні санкції;
- 4) збільшення мита на транспортування води та водомістких товарів за кордон;
- 5) підвищення тарифів (плати) користувачів за водопровідну воду, збирання та видалення комунальних відходів, каналізацію та очищення стічних вод.

Економіко-організаційний механізм водокористування повинен містити підсистему компенсації економічного збитку, що може спричинити, внаслідок споживання забрудненої питної води, погіршення самопочуття населення. Звичайно, можна вважати, що компенсується частина збитку за рахунок зборів за скидання забруднюючих речовин та відбір води, але в цьому випадку – це буде неповна плата, яку начебто компенсує держава через відносно низькі асигнування на безкоштовне медичне обслуговування. Для визначення питомих збитків на території певного басейну від того чи іншого виду господарської діяльності необхідно створювати моніторингові служби. Виникає гостра потреба впровадити механізм, який би міг забезпечити виконання принципу «забруднювач платить».

На сьогоднішній день гостро стоїть питання реалізації адекватної системи оподаткування та системи зборів у сфері водокористування, сприяння формуванню екологічної свідомості водокористувачів та удосконалення системи штрафів. Саме таке управління сприятиме стабільному економічному розвитку та має задовольнити принципи сталого розвитку.

Фінансові потоки у сфері використання та охорони водних ресурсів мають в ідеалі формуватися за рахунок платності водокористування. Тому необхідно виявити джерела формування механізму самофінансування відновлювальних процесів, спрямованих на розвиток комплексу водного господарства.

Сучасна система фінансування водного господарства містить:

- адміністративні податки за видачу дозволів на водокористування або інше використання водних об'єктів;
- встановлення тарифів для промислових і комерційних одержувачів колективних послуг, які пов'язані з використанням води;
- штрафи за порушення регулятивних умов і стандартів або матеріальну відповідальність у разі випадкових чи навмисних дій, які спричиняють шкоду.

Даний перелік необхідно розширити та конкретизувати, включивши до нього:

- платежі за перевищення лімітів скидання забруднюючих речовин та за забруднених вод;
- штрафи за понадлімітний відбір води із водних джерел;
- штрафи за аварійне скидання забруднюючих речовин до водних об'єктів і ґрунт, що призводить до забруднення підземних вод.

За даними світових аналітиків проблема водоспоживання чистої води залежить від культури народів світу та їх фінансових можливостей.

За останнє століття споживання прісної води у світі збільшилася вдвічі, і гідроресурси планети не відповідають такому швидкому зростанню потреб людини. За даними Всесвітньої комісії по воді (World Commission on Water), сьогодні кожній людині щодня потрібно 40 (від 20 до 50) літрів води для пиття, приготування їжі та особистої гігієни. Однак близько мільярда людей у 28 країнах світу не мають доступу до такої кількості життєво важливих ресурсів. Більше 40 % населення світу (близько 2,5 млрд чоловік) проживає в районах, що зазнають середню або гостру нестачу води. Передбачається, що до 2025 року це число зросте до 5,5 млрд і складе дві третини населення Землі.

Найбільш великими споживачами води (за обсягами) є Індія, Китай, США, Пакистан, Японія, Таїланд, Індонезія, Бангладеш, Мексика і РФ.

Цифри загального обсягу споживаної води коливаються від 646 км<sup>3</sup>/рік (Індія) до менш 30 км<sup>3</sup>/рік в Кабо-Верде та в Центральньоафриканській Республіці.

Біля 99 % з 4 000 км<sup>3</sup>/рік води, що використовується для іригації, побутового і промислового споживання, виробництва енергії, що надходить з підземних і поверхневих джерел. Решта – з невідновлюваних (копалін) водоносних шарів, це відноситься, головним чином, до Саудівської Аравії, Лівії та Алжиру.

Ґрунтова вода становить вже 20 % від загального обсягу використовуваних вод, і ця цифра швидко зростає, особливо в посушливих районах. Протягом XX століття відбір ґрунтових вод збільшився в 5 разів.

До країн з великими запасами ґрунтових вод можна віднести Росію, Бразилію, а також ряд екваторіальних африканських країн.

Нестача чистої прісної поверхневої води змушує багато країн активніше використовувати підземні води. У Євросоюзі вже 70 % всієї води, що використовується споживачами, береться з підземних водоносних шарів. У Данії, Литві та Австрії ґрунтові води – єдине джерело прісної води для народного споживання.

В засушливих країнах вода практично повністю береться з підземних джерел (Марокко – 75 %, Туніс – 95 %, Саудівська Аравія і Мальта – 100 %). Підземні водоносні шари залягають всюди, але не скрізь вони поновлювані. Так, в Північній Африці і на Аравійському півострові вони заповнилися водою близько 10 000 років тому, коли клімат тут був більш вологим (рис. 1).

В Екваторіальній і Південній Африці справи з підземними водами йдуть значно краще. Сильні тропічні дощі сприяють швидкому відновленню запасів підземних вод.

Річне споживання ґрунтових вод у всьому світі приймається на рівні 900 км<sup>3</sup> (Юнеско), поновлюваний світовий рівень ґрунтових вод – 12 700 км<sup>3</sup> в рік.

Найбільш забезпечені ресурсами річкових стоків такі держави, як Бразилія, Росія, далі Канада, Китай, Індонезія, США, Індія. Але в останні десятиліття через скиди промислових відходів без очищення багато річок просто отруєні (особливо в Індії, Китаї).

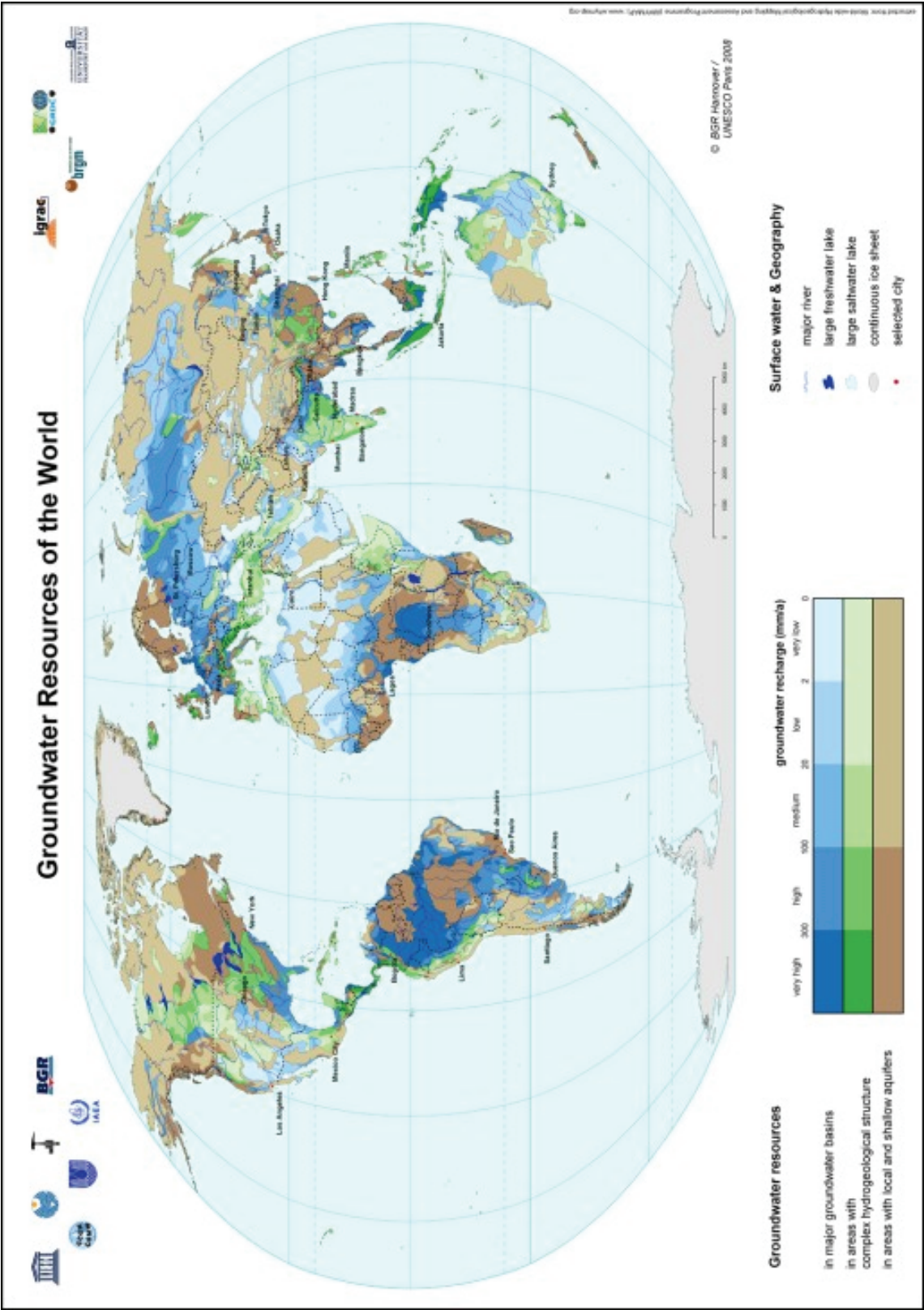
За запасами прісної води наша держава вважається однією з найменш забезпечених у Європі. Ми можемо забезпечити лише 1 тис. кубометрів води на 1 жителя. Для порівняння: у Швеції та Німеччині – це 2,5 тис. кубометрів, у Франції – 3,5, у Великобританії – 5. Близько 1300 наших населених пунктів живуть на привізній воді, а це близько 1 мільйона громадян. Разом з тим, обсяг водоспоживання в Україні за останні 20 років зріс приблизно вдвічі. Основним споживачем прісної води є промисловість, далі йдуть сільське і комунальне господарство.

Як наслідок, за рівнем раціонального використання водних ресурсів та якості води Україна, за даними ЮНЕСКО, серед 122 країн світу посідає 95 місце.

Крім того, маючи обмежені запаси прісної води, Україна, практично не має поверхневих вод, які відповідали б вимогам стандартів, що пред'являються до джерел питного водопостачання (рис. 2).

За даними Міністерства охорони здоров'я України відсоток проб води, що не відповідає санітарно-хімічним та бактеріологічним показникам, склав:

- по Донецькій області від 8,0 до 11,4 %;
- по Луганській області 20–27 %;



**Рисунок 1** – Карта світових запасів прісних ґрунтових вод. *Позначки:* сині межі на карті – території, багаті ґрунтовими водами, коричневі – зони нехватки підземних прісних вод.



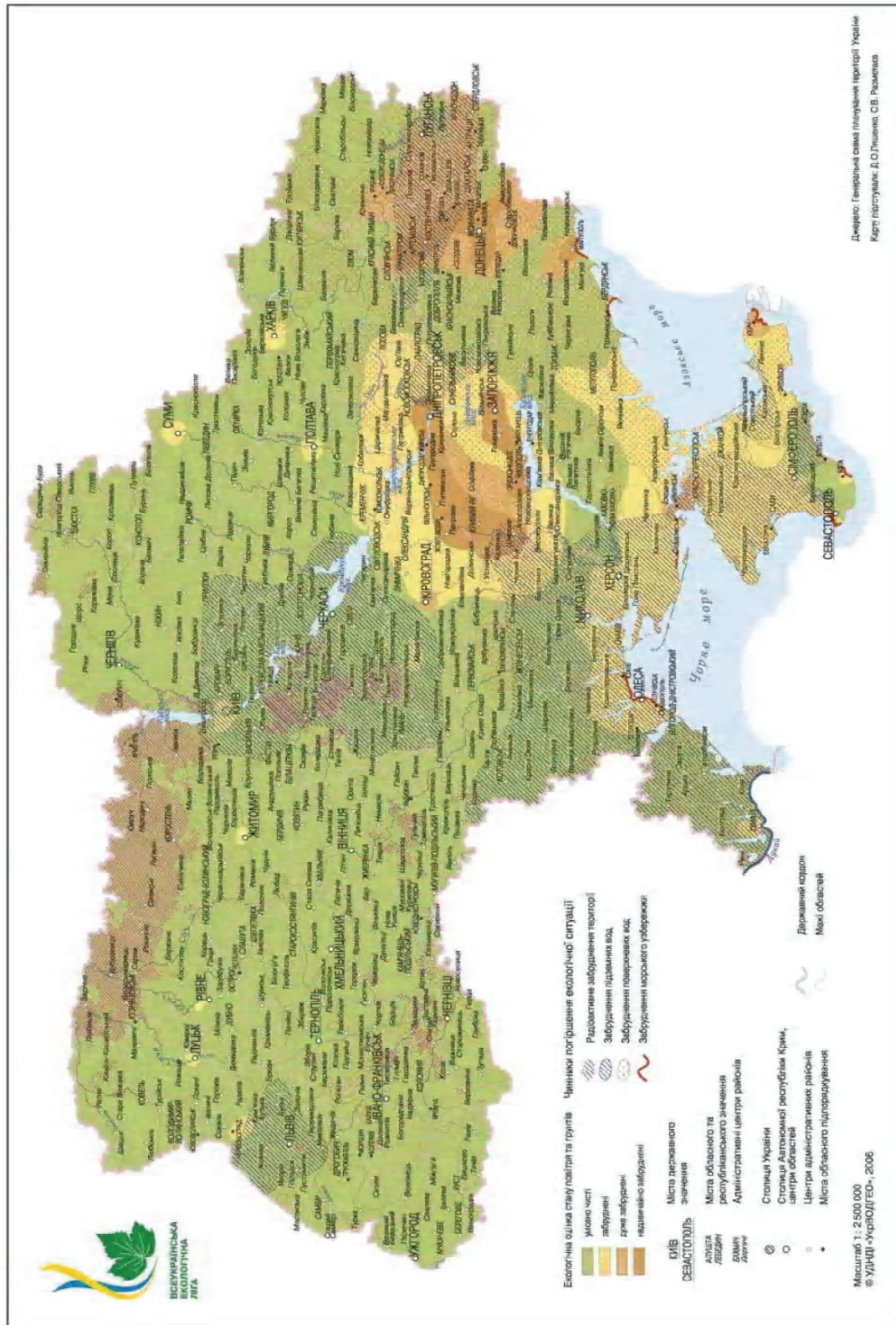


Рисунок 2 – Стан шитних вод України.

- по Харківській області 11,4–15,0 %;
- по Запорізькій області 11,4–15,0 %

На основі статистичних та аналітичних даних необхідно розширити діяльність з розробки концепції охорони водного середовища та раціонального використання водних ресурсів та створити регіональні моніторингові центри з питань підтримки якості поверхневих вод та соціальної поінформованості суспільства наслідків вживання неякісної питної води.

Рекомендовано запропонувати Українській водній асоціації наступні напрямки діяльності:

- розробка та доповнення сучасної термінологічної бази з питань водопідготовки та водоочищення;
- ініціювання прийняття Закону України «Про основні напрями державної політики у галузі регулювання водних ресурсів»;
- участь у відповідних програмах та проектах Міністерства екології та природних ресурсів України;
- участь в обговоренні проекту нового Закону України «Про воду»;
- створення спеціалізованої експертної ради при Українській Водній Асоціації;
- участь у розробці державної програми захисту і підтримки українського виробника в галузі водоочищення та водопостачання.

## ВИСНОВКИ

Проаналізувавши досвід побудови і функціонування механізмів водокористування у країнах Європи та СНД, а також опрацювавши галузеву статистичну інформацію щодо України, необхідно зробити наступні висновки:

- 1) трансформаційні процеси, що безперервно відбуваються в економічних системах різних країн світу вимагають постійного моніторингу та врахування екологічного фактора;
- 2) основою оптимального розподілу та використання водних ресурсів виступає регульований ринок води, а не державна чи міжнародна дотаційна політика;
- 3) актуальність побудови ефективного механізму водокористування зростає з підвищенням інтенсивності промислового розвитку та зростанням густоти населення регіону в цілому;
- 4) відсутність у більшості країн СНД гармонізованої до міжнародних стандартів системи статистичного моніторингу стану та ефективності використання водних ресурсів призводить до недооцінки ролі та значення останніх для національних економік, міжнародних конфліктів;
- 5) динамічне зростання міжнародної торгівлі «віртуальними водними ресурсами» зменшує рівень залежності держав від природних джерел вод, що вимагає розроблення адекватного методичного інструментарію підтримки управлінських рішень з урахуванням цих чинників.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Abakumov, V. A. Hydro biological monitoring of the state of freshwater ecosystem and ways to its improvement [Текст] / V. A. Abakumov, L. M. Sushenya // Ecological Modifications and Criteria for Ecological Standardization / Edited by Proc. Nalchik, USSR Symp. – St. Petersburg : Gidrometeoizdat, 1992. – P. 33–34.
2. Kalusche, D. O. Oekologie in Zahlen: eine Dstensammlung in Tabellen mit ueber 10 000 Einzelwerten [Текст] / D. O. Kalusche. – Stuttgart; Yena; New York : G. Fischer, 1996. – 156 p.
3. Бурлибаев, М. Ж. Комплексная оценка качества поверхностных вод по гидрохимическим показателям [Текст] / М. Ж. Бурлибаев, Ж. Н. Байманов, Е. А. Тажагамбетов. – А. : Галым, 2007. – 228 с.
4. Моткин, Г. А. Основы экологического страхования [Текст] / Г. А. Моткин. – М. : Наука, 1996. – 265 с.
5. Подлепа, С. А. Система экологического управления на базе стандартов ИСО серии 14000. Некоторые проблемы разработки и внедрения [Текст] / С. А. Подлепа, Е. В. Пашков // Стандарты и качество. – СПб. : Изд-во СПбГЭТУ, 1998. – № 5. – С. 78–82.
6. Кульский, Л. А. Технология очистки природных вод [Текст] / Л. А. Кульский, П. П. Строкач. – К. : Вища школа, 1981. – 328 с.

Отримано 19.09.2014

А. Н. НАЗАРЕНКО <sup>a</sup>, В. В. ПОПЛАВСКАЯ <sup>b</sup>  
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЫНКА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

<sup>a</sup> Запорожская государственная инженерная академия, <sup>b</sup> Департамент жилищно-коммунального хозяйства Запорожского ГИ

На протяжении длительного времени достаточно распространенной была концепция «безвозмездности» водных ресурсов, и поэтому вопрос об их денежной оценке даже не возникал. Но развитие экономики потребовало привлечения все большего количества природных ресурсов и привело к их дефициту, заставил ученых изменить свои взгляды относительно даров природы. На сегодняшний день изучается возможность создания региональных учреждений, которые будут создавать условия для формирования рынка водных ресурсов.

**бесплатность, ответственность, ресурсы, плата, загрязнение, штраф, сброс, лимит, чистая вода, спрос**

OLEXIY NAZARENKO <sup>a</sup>, VALERIA POPLAVSKAYA <sup>b</sup>  
THEORETICAL ASPECTS OF THE WATER RESOURCES MARKET

<sup>a</sup> Zaporozhe State Engineering Academy, <sup>b</sup> Department of Housing and Communal Services of Zaporozhe municipality

For a long time concept of «gratuitousness» of water resources was widespread, and so the question of their monetary value even arisen. But the economy, which required the involvement of an increasing number of natural resources and led to their deficits has forced scientists to change their views regarding the gifts of nature. Today, we study the possibility of establishing regional institutions that will create the conditions for market water.

**free of charge, responsibility, resources, pay, contamination, fine, upcast, limit, clean water, demand**

**Назаренко Олексій Миколайович** – доцент кафедри теплоенергетики Запорізької державної інженерної академії. Наукові інтереси: розвиток загальної концепції екологізації промислових підприємств шляхом замикання систем виробничого водопостачання методом збереження стабільності водно-хімічного балансу. Участь у розробці технологічних норм проектування водного господарства підприємств.

**Поплавська Валерія Владиславівна** – заступник начальника відділу Департаменту Житлового комунального господарства Запорізької МР. Наукові інтереси: розвиток загальної концепції екологізації промислових підприємств шляхом замикання систем виробничого водопостачання методом збереження стабільності водно-хімічного балансу.

**Назаренко Алексей Николаевич** – доцент кафедры теплоэнергетики Запорожской государственной инженерной академии. Научные интересы: развитие общей концепции экологизации промышленных предприятий путем замыкания систем производственного водоснабжения методом сохранения стабильности водно-химического баланса. Участие в разработке технологических норм проектирования водного хозяйства предприятий.

**Поплавская Валерия Владиславовна** – заместитель начальника отдела Департамента Жилищно-коммунального хозяйства Запорожского ГИ. Научные интересы: развитие общей концепции экологизации промышленных предприятий путем замыкания систем производственного водоснабжения методом сохранения стабильности водно-химического баланса.

**Nazarenko Olexiy** – PhD (Eng.), Associate Professor, Heat Energy Department, Zaporozhe State Engineering Academy. Scientific interests: development of the overall concept of greening the industry by closing industrial water supply systems by maintaining stability of water and chemical balance. Participation in the development of technology standards for design water management enterprises.

**Poplavskaya Valeria** – Deputy Head of Housing and Communal Services Department, of Zaporozhe municipality. Scientific interests: development of the overall concept of greening the industry by closing industrial water supply systems by maintaining stability of water and chemical balance.



УДК 621.444.4+621.412

**С. А. ГОРОЖАНКИН, А. В. ЧУХАРКИН**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## **ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ КОМБИНИРОВАННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ВНЕШНИМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ**

Выполнен анализ возможностей комбинированных силовых установок, включающих газотурбинные двигатели и двигатели Стирлинга. Рассмотрены варианты принципиальных схем построения таких установок. Проведен анализ термодинамических циклов, найдены зависимости для вычисления их основных параметров. На основе результатов исследований дана количественная оценка степени использования теплоты продуктов сгорания газотурбинного двигателя для работы двигателя Стирлинга, определены предельные значения его КПД, мощности и КПД установок в целом. Выдвинуты предложения по применению и расширению возможностей таких установок в составе транспортных средств.

**комбинированная силовая установка, газотурбинный двигатель, двигатель Стирлинга, термодинамические циклы, коэффициент полезного действия, мощность**

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

В настоящее время известно большое количество схем комбинированных энергетических установок, включающих газотурбинные двигатели (ГТД). К ним следует отнести парогазовые, газопаровые, комбинированные двигатели внутреннего сгорания (ДВС), в том числе турбокомпаундные ДВС, свободнопоршневые газогенераторы, работающие совместно с газовыми турбинами и др. [1]. В то же время информация о возможностях использования двигателей Стирлинга (ДС) в составе комбинированных силовых установок крайне ограничена. Рассматривается возможность использования газов, отводимых из газовой турбины, в качестве источника теплоты для ДС, одним из главных достоинств которого является высокий термический КПД. Таким образом, становится возможным создание комбинированной установки, включающей ГТД и ДС. Ее важным преимуществом, помимо увеличения КПД, является также экологическая чистота отводимых газов, возможность использования других источников теплоты, альтернативных и возобновляемых топлив.

### **ЦЕЛИ**

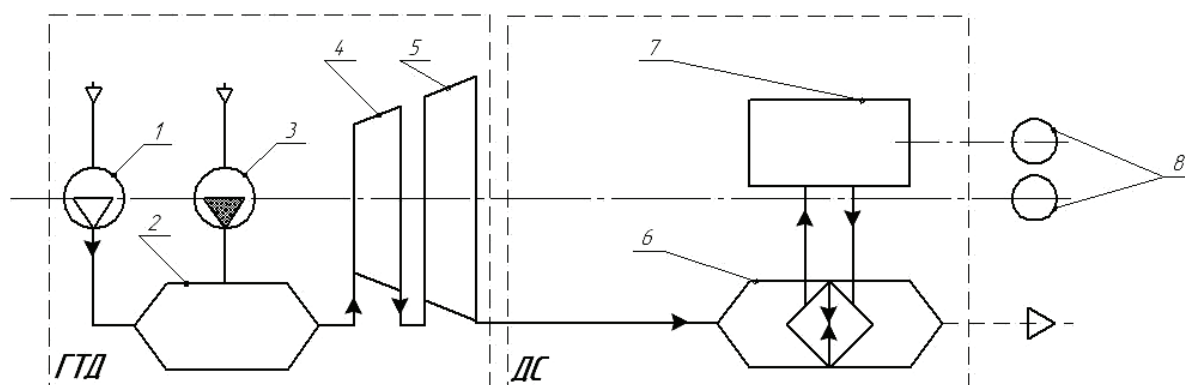
Работа посвящена анализу термодинамических циклов и возможностей комбинированных силовых установок, в состав которых входят два двигателя – газотурбинный и Стирлинга.

Известен ряд работ по использованию теплоты продуктов сгорания автотракторных дизельных ДВС в качестве источников теплоты для вспомогательных двигателей Стирлинга небольшой мощности [2]. КПД и мощность таких ДС невелики, но в целом повышается энергоэффективность силовой установки, поскольку эти газы являются одним из видов вторичных тепловых энергоресурсов, а сама установка становится комбинированной.

Характерной особенностью ГТД является большая мощность в одном агрегате, а также значительный расход рабочего тела на единицу эффективной мощности. Теплота отработавших газов за газовой турбиной используется в комбинированных парогазовых установках для получения пара, работающего в дополнительной (паровой) турбине. Конечная температура газов за последней ступенью газовой турбины является, по существу, исходной для парового котла-утилизатора, устанавливаемого в такой установке.

Для современных транспортных силовых установок, включающих ГТД, одной из особенностей является сравнительно высокая температура газов за турбиной. Это объясняется отсутствием регенераторов теплоты (при высокой степени повышения давления регенерация невозможна), а также стремлением предельно увеличивать максимальную температуру перед турбиной ГТД, что, в свою очередь, повышает температуру газов на выходе из двигателя. Последнее дает возможность использования их теплоты для работы второго двигателя комбинированной силовой установки – двигателя Стирлинга, обладающего высоким КПД [3]. Для этого газы необходимо подавать в нагреватель ДС. При этом повышается не только суммарная мощность комбинированной установки, но и возрастает ее суммарный (приведенный) КПД, поскольку для работы ДС дополнительного топлива не требуется. При этом сохраняются значительные преимущества ГТД с точки зрения низких значений выбросов вредных в экологическом отношении ингредиентов.

Одна из простейших рассматриваемых схем такой комбинированной установки представлена на рисунке 1.



**Рисунок 1** – Схема комбинированного двигателя без дожигания топлива за турбиной: 1 – компрессор; 2 – камера сгорания; 3 – топливный насос; 4 – турбина компрессора; 5 – силовая турбина; 6 – нагреватель; 7 – двигатель Стирлинга; 8 – нагрузки.

В соответствии с приведенной схемой газы, покидающие газовую турбину, перед удалением их в атмосферу поступают в нагреватель ДС, представляющий собой рекуперативный теплообменник с развитыми оребренными поверхностями теплообмена со стороны газов. Теплоту к рабочему телу внутреннего контура ДС (гелий или водород) целесообразно передавать с помощью промежуточного жидкометаллического теплоносителя либо тепловых труб. В этом случае осуществляется передача теплоты непосредственно во внутренний контур, а также обеспечиваются оптимальные параметры цилиндров, нагревателя, регенератора и охладителя ДС [4].

На рисунке 2 представлены идеальные циклы ГТД и ДС в  $Ts$ -координатах. В цикле ГТД (рис. 2а) часть теплоты, отводимой в процессе 41 (процесс 47), передается двигателю Стирлинга. Соответственно, в цикле двигателя Стирлинга подвод теплоты, которая отводится в цикле ГТД, представлен изобарным процессом 74 (рис. 2б). Отвод теплоты в цикле ДС осуществляется в изотермическом процессе 56 при температуре охладителя  $T_5$ . Процессы 45 и 67 представлены адиабатными с учетом регенерации теплоты во внутреннем контуре ДС [5, 6].

Для оценки эффективности предлагаемого комбинированного двигателя необходимо рассмотреть параметры циклов ГТД и ДС с учетом того, что подвод теплоты к нагревателю ДС осуществляется не в изотермическом, а в изобарном процессе, что приводит к некоторому снижению КПД его цикла.

Термический КПД идеального цикла ГТД с подводом теплоты при постоянном давлении определяется, в соответствии с теоретическими положениями, только степенью повышения давления  $\pi$  согласно зависимости

$$\eta_{i_{ГТД}} = 1 - \frac{1}{\pi^{(k-1)/k}},$$

где  $k$  – показатель адиабаты рабочего тела.

С учетом температур в характерных точках цикла этот КПД можно представить как

$$\eta_{i_{ГТД}} = 1 - \frac{q_{41}}{q_{23}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}. \quad (1)$$

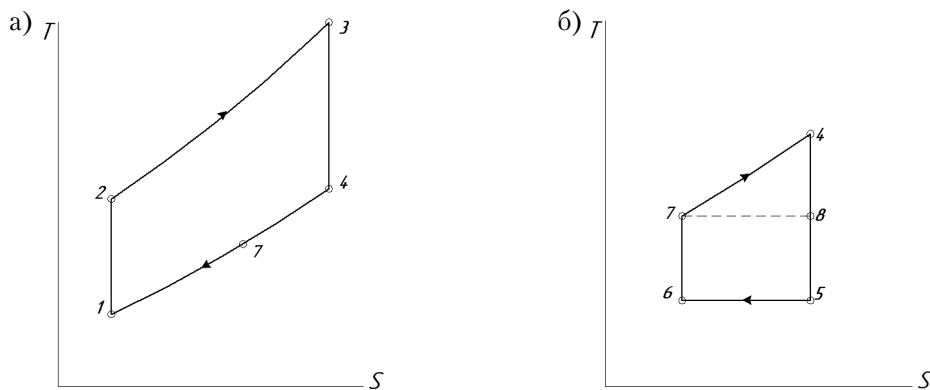


Рисунок 2 – Диаграммы циклов газотурбинного двигателя (а) и двигателя Стирлинга (б).

Удельная теплота и работа цикла ГТД определяются в соответствии с выражением

$$l_{\text{ГТД}} = q_{\text{ГТД}} = c_p (T_3 + T_4 - T_1 - T_2). \quad (2)$$

Часть теплоты  $q_{41}$ , отводимой в цикле ГТД, передается нагревателю двигателя Стирлинга в процессе 47. Эта теплота может быть подведена к указанному нагревателю, причем ее целесообразно выразить через степень использования располагаемой теплоты  $\mu$

$$q_{\text{ДС}} = \mu(i_4 - i_5) = \mu c_p (T_4 - T_5), \quad (3)$$

где  $T_5$  – температура охладителя двигателя Стирлинга.

Очевидно, что для работы ДС теплота  $q_{\text{ДС}}$  в случае установки только одного нагревателя полностью использована быть не может, т.к. она передается в изобарном процессе 74. Если принять, что отвод теплоты осуществляется в изотермическом процессе 56 при температуре охладителя  $T_5$ , то термический КПД ДС при полной внутренней регенерации определится как КПД регенеративного цикла Карно 7 856, т. е.

$$\eta_{\text{т.ДС}} = 1 - \frac{q_{56}}{q_{78}} = 1 - \frac{T_5}{T_7}.$$

Температуру  $T_7$  можно выразить как

$$T_7 = T_4 - \mu(T_4 - T_5).$$

Удельная теплота и работа цикла двигателя Стирлинга с учетом этого определяются как

$$l_{\text{ДС}} = q_{\text{ДС}} = (T_7 - T_5) \Delta s_{65} = c_p (T_7 - T_5) \ln(T_4/T_7) = c_p (1 - \mu)(T_4 - T_5) \ln(T_4/((1 - \mu)T_4 + \mu T_5)), \quad (4)$$

где  $\Delta s_{65}$  – изменение энтропии в процессах подвода и отвода теплоты;  
 $c_p$  – изобарная удельная теплоемкость рабочего тела.

Полученные зависимости дают возможность определить суммарную работу циклов такой комбинированной установки, а также вычислить значение ее термического КПД. Полагая, что массовые расходы рабочего тела через тракты ГТД и ДС одинаковы, для удельной работы получим

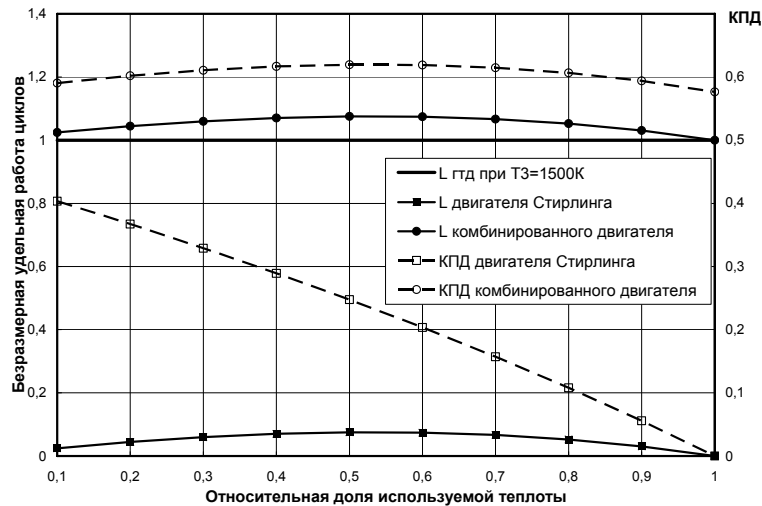
$$l_u = q_u = c_p [(T_3 - T_2 - T_4 + T_1) + (1 - \mu)(T_4 - T_5) \ln(T_4/((1 - \mu)T_4 + \mu T_5))]. \quad (5)$$

Тогда термический КПД (приведенный КПД) составит

$$\eta_t = \frac{l_u}{q_{23}} = \frac{(T_3 - T_2 - T_4 + T_1) + (1 - \mu)(T_4 - T_5) \ln(T_4/((1 - \mu)T_4 + \mu T_5))}{T_3 - T_2}. \quad (6)$$

В приведенных зависимостях температуры  $T_2$  и  $T_4$  легко определяются через температуры  $T_1$  и  $T_3$  цикла ГТД и степень повышения давления  $\pi$ . Из выражений (5) и (6) следует, что работа цикла (и, соответственно, мощность), а также КПД комбинированной установки определяются только температурами в характерных точках циклов рассматриваемых двигателей и соотношениями этих температур, а также степенью использования располагаемой теплоты  $\mu$ .

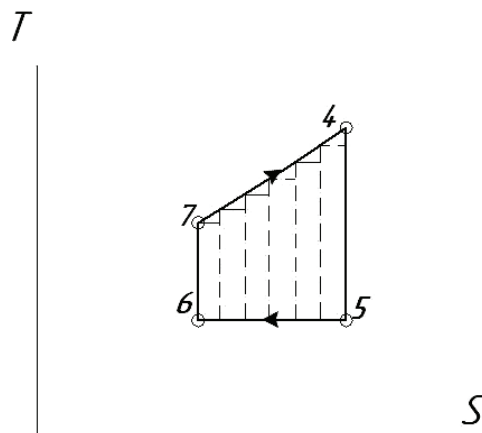
Расчетные зависимости для работы циклов и КПД составляющих двигателей – газотурбинного и Стирлинга, а также комбинированной установки представлены графически на рисунке 3 для интервала изменений  $\mu$  от 0,1 до 1,0. Температуры, принятые в расчетах, принимались в соответствии с их значениями, характерными для работы транспортных двигателей наземной техники, а именно:  $T_1 = 298 \text{ К}$ ,  $T_5 = 358 \text{ К}$ ,  $T_3 = 1500 \text{ К}$ ,  $\pi = 20$ . Удельная работа циклов представлена в безразмерном виде, т.е. отнесена к удельной работе ГТД.



**Рисунок 3** – Зависимости работы цикла и КПД двигателей – газотурбинного, Стирлинга и комбинированного от степени использования располагаемой теплоты.

Результаты показывают, что КПД ДС с увеличением  $\mu$  неуклонно снижается и при  $\mu = 1$  становится равным нулю. Работа цикла при этом возрастает, достигает максимума при  $\mu = 0,5$  и затем убывает с приближением степени использования теплоты к единице. Приращение суммарной работы комбинированного двигателя при  $\mu = 0,5$  составляет 7,5 %. Значение его КПД при этом составляет 0,618, что существенно выше, чем у ГТД, составляющего 0,575.

Для достижения максимального термического КПД ДС желательно использовать всю теплоту  $q_{дс}$ , определяемую выражением (3). Однако для этого необходимо обеспечить многоступенчатый отвод теплоты к его нагревателям с последовательным снижением температуры, как это показано на диаграмме, представленной на рисунке 4. Такое становится возможным при передаче теплоты отводимых газов ГТД к нескольким нагревателям многоцилиндрового ДС. Его следует рассматривать как группу одноцилиндровых, работающих на общий вал привода и нагрузку. В пределе, при увеличении числа этих нагревателей и цилиндров, теплота  $q_{дс}$  может быть практически полностью использована для работы двигателя. Тогда его термический КПД  $\eta_{тдс}^*$  определится как



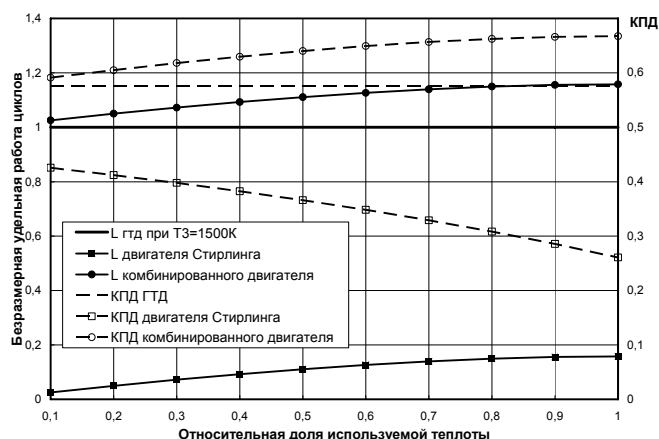
**Рисунок 4** – Диаграмма цикла многоцилиндрового двигателя Стирлинга со ступенчатым подводом теплоты.

$$\eta_{i_{дс}}^* = 1 - \frac{q_{65}}{q_{74}} = 1 - \frac{T_5}{(T_4 - T_7) / \ln(T_4/T_7)}. \quad (7)$$

Удельная теплота и работа цикла в этом случае составят

$$l_{и_{дс}}^* = q_{и_{дс}}^* = q_{74} - q_{65} = c_p((T_4 - T_7) - T_5 \ln(T_4/T_7)). \quad (8)$$

Расчеты в соответствии с уравнениями (7) и (8) показывают, что в данном варианте КПД ДС с увеличением  $\mu$  также снижается, но при  $\mu = 1$  его значение составляет 0,26, что вполне приемлемо с учетом того, что относительная работа цикла непрерывно возрастает и при  $\mu = 1$  становится равной 1,158. Таким образом, эквивалентное увеличение мощности комбинированного двигателя достигает 15,8 %. КПД комбинированного двигателя при этом составляет 0,666, как это показано на рисунке 5. Даже при степени использования теплоты  $\mu = 0,5$  удельная работа возрастает на 11 %, а КПД составляет 0,639.



**Рисунок 5** – Зависимости работы цикла и КПД ГТД, ДС и комбинированного двигателя при многоступенчатом отводе теплоты для многоцилиндровых двигателей Стирлинга.

Двигатели Стирлинга хорошо зарекомендовали себя в составе судовых силовых установок. Во многом это объясняется тем, что использование в этом случае в качестве низкотемпературного источника (теплоприемника) морской или речной воды позволяет существенно снизить температуру (до 30÷40 °С) в охладителях ДС и повысить таким образом их эффективный КПД. Для ДС, использующих теплоту отводимых газов ГТД, это проявляется наиболее ярко, поскольку существенно возрастает отношение температур  $T_4/T_5$  в нагревателе и охладителе. Предварительные расчеты показывают, что прирост суммарной мощности при этом может достигать 15 % при  $\mu = 0,5$ .

Приводимые в данной работе результаты не учитывают, естественно, тепловых, механических и др. потерь в двигателях предлагаемой схемы. В настоящее время авторы проводят исследования параметров действительных циклов таких установок, ряда установок других схем.

## ВЫВОДЫ

1. Исследование циклов комбинированных двигателей на базе двигателей с внешним подводом теплоты (ГТД и ДС) дает возможность создавать энергоэффективные и достаточно чистые в экологическом отношении силовые установки.
2. Характеристики таких комбинированных двигателей в значительной мере зависят от параметров окружающей среды, которые обязательно необходимо учитывать в ходе исследований и конструирования как двигателей Стирлинга, так и установок в целом.
3. Многоступенчатый подвод теплоты уходящих газов ГТД к нагревателям двигателей Стирлинга обеспечивает наиболее эффективное ее использование при существенном повышении КПД комбинированных двигателей и силовых установок на их базе.
4. Предлагаемые схемы комбинированных двигателей могут быть рекомендованы для применения в силовых установках транспортных средств.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрищенко, А. И. Основы термодинамики циклов теплоэнергетических установок [Текст] / А. И. Андрищенко. – М. : Высш. школа, 1985. – 319 с.
2. Дуюн, В. И. Применение двигателя Стирлинга для обеспечения автономности тепловых генераторов мобильной техники [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02 / В. И. Дуюн. – Челябинск, 1997. – 149 с.
3. Уокер, Г. Двигатели Стирлинга [Текст] : Пер с англ. / Г. Уокер. – М. : Машиностроение, 1985. – 408 с.
4. Горожанкин, С. А. Машины Стирлинга [Текст] : параметры рабочих процессов / С. А. Горожанкин. – Макеевка : ДонГАСА, 2003. – 208 с. – ISBN 966-7477-31-2.
5. Urieli, I. Stirling Cycle Engine Analysis [Текст] / I. Urieli, D. M. Berchowitz. – Bristol : Adam Hilger, 1984. – 256 p.
6. Organ, Allan J. Thermodynamics and Gas Dynamics of the Stirling Cycle Machine [Текст] / Allan J. Organ. – Oxford : Cambridge University Press, 1992. – 451 p.

Получено 03.10.2014

С. А. ГОРОЖАНКІН, А. В. ЧУХАРКІН  
ТЕРМОДИНАМІЧНІ ЦИКЛИ КОМБІНОВАНИХ ДВИГУНІВ ІЗ  
ЗОВНІШНІМ ПІДВЕДЕННЯМ ТЕПЛОТИ  
Донбаська національна академія будівництва і архітектури

Виконано аналіз можливостей комбінованих силових установок, що включають газотурбінні двигуни і двигуни Стірлінга. Розглянуто варіанти принципових схем побудови таких установок. Проведено аналіз термодинамічних циклів, знайдено залежності для розрахунку їхніх основних параметрів. На основі результатів досліджень дано кількісну оцінку ступеня використання теплоти продуктів згоряння газотурбінного двигуна для роботи двигуна Стірлінга, визначено граничні значення його ККД, потужності і ККД установок у цілому. Висунуто пропозиції щодо використання й розширення можливостей таких установок у складі транспортних засобів.

**комбінована силова установка, газотурбінний двигун, двигун Стірлінга, термодинамічні цикли, коефіцієнт корисної дії, потужність**

SERGEY GOROZHANKIN, ARTEM CHUKHARKIN  
THERMODYNAMIC CYCLES OF A COMBINED ENGINES WITH EXTERNAL  
HEAT SUPPLY  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

The analysis of combined power plants including gas turbine engines and Stirling engines has been made. The variants of construction concepts of such power plants has been considered. The analysis of thermodynamic cycles has been performed, the dependences to calculate their basic parameters has been founded. Based on the research results quantify the heat utilization degree of the combustion products of a gas turbine engine for the Stirling engine has been given, its efficiency limits, power and power plant's efficiency in general has been identified. Proposals for the application and the empowerment of such plants as part of the vehicles has been offered.

**combined power plant, gas turbine engine, Stirling engine, thermodynamic cycles, efficiency, power**

**Горожанкін Сергій Андрійович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобілів та автомобільного господарства Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: теплові двигуни, енергоощадження в системах теплопостачання та гарячого водопостачання з використанням теплових насосів.

**Чухаркін Артем Віталійович** – асистент кафедри автомобілів та автомобільного господарства Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: робочі процеси транспортних двигунів.

**Горожанкин Сергей Андреевич** – доктор технических наук, профессор кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: тепловые двигатели, энергосбережение в системах теплоснабжения и горячего водоснабжения с использованием тепловых насосов.

**Чухаркин Артем Витальевич** – ассистент кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: рабочие процессы транспортных двигателей.

**Gorozhankin Sergey** – DSc (Eng.), Professor, Head of Automobiles and Automobiles Engineering Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: thermal engines, saving in heat and hot water supply systems with use of heatpumps.

**Chukharkin Artem** – Assistant, Automobiles and Automobiles Engineering Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: internal processes of vehicle's engines.

УДК 697.353.2

**А. А. ОЛЕКСЮК, И. Г. ШИТИКОВА**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ТЕПЛООБМЕННИКЕ ЗМЕЕВИКОВОГО ТИПА ДЛЯ НЕЗАВИСИМЫХ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ И ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

В данной статье рассматривается моделирование процесса теплообмена в многоконтурном теплообменнике змеевикового типа, изолированного слоем пенополиуретана и ПЭТФ напылением, для независимого присоединения систем отопления и горячего водоснабжения. Показаны особенности течения потоков в межтрубном пространстве, их влияние на теплообмен и температуру теплоносителей первого и промежуточных контуров. Представлены картины распределения тепломассообменных потоков в змеевиках. Проводится сравнение и анализ результатов, полученных с использованием моделей.

**подогревательно-аккумуляторная установка, трехконтурный теплообменник, система независимого теплоснабжения**

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

В различных отраслях промышленности и ЖКХ одним из наиболее распространенных видов технологического оборудования являются теплообменные аппараты.

Внедрение эффективных и дешевых теплообменников змеевикового типа, выполненных в виде интенсифицированных теплообменных труб, приведет к существенной экономии материальных и энергетических ресурсов.

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

Рассмотрена статья [1, 2] в которой приводят сравнительный анализ параметров теплообменника, полученных по методике компьютерной гидрогазодинамики и практической методике проектирования теплообменных аппаратов. На основе предложенных решений сделана модель теплообмена и движения теплоносителя в сердцевине теплообменника змеевикового типа (промежуточном теплообменнике)

### **ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Это позволит повысить степень достоверности основных расчетных параметров теплообмена и выбрать рациональные конструкции и режимы их эксплуатации. Наглядно увидеть модель потоков теплоносителя в теплообменнике змеевикового типа.

### **ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ**

Важным направлением решения задач ресурсо- и энергосбережения является разработка и внедрение новых видов развитых конвективных поверхностей теплообмена, отличающихся высокой теплогидродинамической эффективностью, технологичностью и невысокой стоимостью. Теплообменник работает следующим образом: первичный теплоноситель поступает в межтрубное пространство теплообменника, образованное корпусом и змеевиковыми трубками. Отдав свою теплоту через поверхности змеевиков систем отопления и горячего водоснабжения и поверхности корпуса бака-аккумулятора, возвращается к источнику теплоты. Нагреваемая водопроводная вода поступает в

© А. А. Олексюк, И. Г. Шитикова, 2014



змеевик системы ГВ, где нагревается до температуры 55–60 °С, после чего сливается в аккумулирующую емкость, из которой расходится на нужды горячего водоснабжения. По второму змеевику постоянно циркулирует вода системы отопления при помощи бесшумного насоса [7]. На рисунке 1 приведена модель корпуса и змеевиков теплообменника.

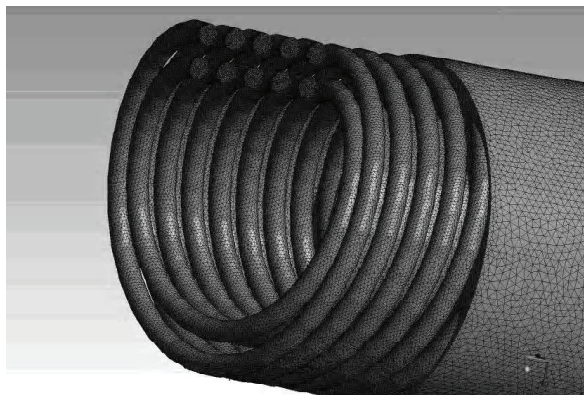


Рисунок 1 – Модель промежуточного теплообменника.

При таком конструктивном решении жидкость движется по сложной траектории в межтрубном пространстве из-за внешнего турбулентного движения реализуется закрученное течение со сложной трехмерной вихревой структурой, что интенсифицирует теплообменные процессы, протекающие в межтрубном пространстве. Внутренние змеевики теплообменных элементов закреплены в дополнительных трубных решетках, установленных в корпусе.

Сводка данных о геометрии течения в пространстве между трубами приведена в таблице 1, угол ориентации к горизонту, и на рисунке 2.

Таблица 1 – Характеристика геометрии трактов и течения потока в межтрубном пространстве

Змеевиков внутреннего ряда	91,5
Змеевиков наружного ряда	99,1
Потока у внутренней стенки	111,6
Потока в тракте между змеевиками	117,1
Потока у наружной стенки	113,7

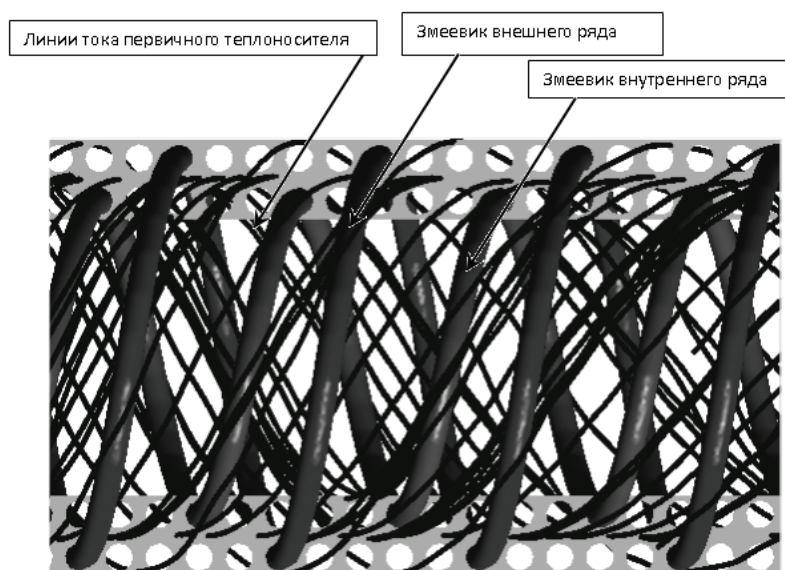


Рисунок 2 – Линии тока в поперечном сечении межтрубного пространства.

В целях улучшения внутренней гидродинамической обстановки целесообразно, на авторский взгляд, формировать поверхности теплообмена в виде змеевиков, что приведет к закрутке потока внутри трубы и, как следствие, к интенсификации теплообмена. Заметим также, что турбулизация потока увеличивается за счет поступления теплоносителя по тангенциальному входу в промежуточный теплообменник [3]. Интенсификация теплообмена в теплообменнике змеевикового типа позволяет уменьшить минеральные отложения на внутренней поверхности примерно в два раза по сравнению со скоростным теплообменником [4]. В связи с этим представляет практический интерес предлагаемый авторами тип теплообменника, витки которого выполнены из медной трубки поперечного сечения 0,02 м. Металлоемкость конструкций снижается как минимум на 20 %.

Распределение температуры на наружной поверхности змеевиков приведено на рисунке 3. Максимальное различие температур поверхности составляет ~15 °С. Результаты лабораторных исследований процессов теплообмена между греющим теплоносителем из котла и вторичными и для контуров отопления и ГВС приведены в таблице 2.

**Таблица 2** – Результаты лабораторных исследований контура системы отопления в теплообменнике змеевикового типа на опытно-экспериментальном стенде

№ п/п	$W_{om}$ , кг/с	$G_c$ , кг/с	$\omega_{om}^{mp}$ , м/с	$\omega_c^{u.mp.}$ , м/с	$T_1$ , °С	$T_2$ , °С	$\Delta t_{cp}$ , °С	$Q_{om}$ , Вт	K, Вт/(м²·°С)	$\omega_{om}^{mp} / \omega_c^{u.mp.}$	$W_{om} / G_c$
1	0,075	0,181	0,239	0,576	80	64	38,6	12 163	1 180	0,415	0,414
		0,305	0,239	0,970	80	68	48,8	15 372	1 330	0,246	0,245
		0,375	0,239	1,224	80	69	55	17 325	1 410	0,195	0,2
		0,430	0,239	1,369	80	71	51,6	16 254	1 575	0,175	0,174
2	0,125	0,181	0,398	0,576	80	57	33,3	17 485	1 700	0,690	0,690
		0,305	0,398	0,970	80	60	48,8	25 620	1 825	0,410	0,41
		0,375	0,398	1,224	80	62	54,0	28 350	1 970	0,325	0,333
		0,430	0,398	1,369	80	64	55,04	28 896	2 110	0,290	0,29
3	0,153	0,181	0,487	0,876	80	57	27,2	17 485	1 795	0,845	0,845
		0,305	0,487	0,970	80	60	39,85	25 620	1 945	0,502	0,50
		0,375	0,487	1,224	80	62,5	42,89	27 562	2 130	0,398	0,41
		0,430	0,487	1,369	80	64	44,97	28 896	2 280	0,356	0,356
4	0,295	0,181	0,938	0,576	80	57,5	13,80	17 104	2 120	1,628	1,63
		0,305	0,938	0,970	80	59,5	21,19	26 260	2 500	0,967	0,967
		0,375	0,938	1,224	80	62	22,88	28 350	2 720	0,766	0,766
		0,430	0,938	1,369	80	63	24,77	30 702	2 810	0,685	0,685
5	0,433	0,181	1,379	0,576	80	56	10,03	18 245	2 395	2,390	2,39
		0,305	1,379	0,970	80	59	14,79	26 901	2 710	1,421	1,42
		0,375	1,379	1,224	80	61	16,45	29 925	2 910	1,127	1,15
		0,430	1,379	1,369	80	62	17,87	32 508	3 170	1,007	1,007

$$1. Q_{om} = G_c \cdot 4200(T_1 - T_2) \cdot \text{кг} / \text{с} = W_{om} \cdot 4200(T_{10} - T_{20}).$$

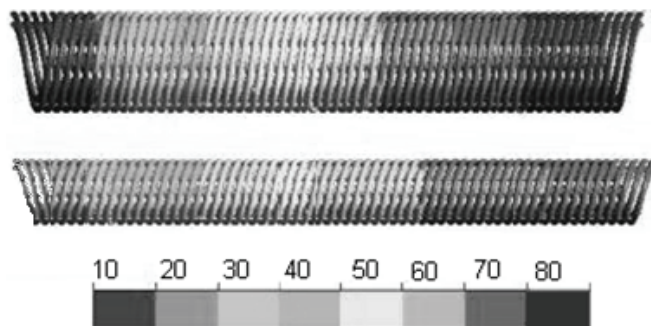
$$2. (T_{10} - T_{20}) = \frac{Q_{om}}{W_{om} \cdot 4200}, ^\circ \text{C}.$$

$$3. K = \frac{Q_{om}}{F_{зм}^{om} \cdot \Delta t_{cp}} [\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{C}].$$

Обработка экспериментальных данных позволила построить модель распределения температуры на поверхности змеевиков системы отопления и горячего водоснабжения, при изменении расхода первичного теплоносителя с постоянной температурой  $T_1 = 80$  °С показаны на рисунках 3. Значения температур поверхности промежуточного теплообменника лежат в пределах 10...80 °С.

## ВЫВОДЫ

Выполненное моделирование позволило установить важные особенности течения и теплообмена в змеевиковых поверхностях модельного промежуточного теплообменника. Показано, что течение в межтрубном пространстве змеевиковой поверхности формируется как продольное вдоль осей труб спиральное течение, а не как поперечное обтекание коридорного пучка труб. Оценки показывают, что гидравлические потери при продольном течении потока вдоль змеевиков оказываются меньшими, чем при традиционно рассматриваемом поперечном обтекании пучков прямых, ориентированных нормально потоку труб [2]. Теплоотдача от отдельных областей течений в трактах между



**Рисунок 3** – Распределение температуры на поверхности змеевиков системы отопления и горячего водоснабжения.

змеевиками и кожухами к теплоносителю промежуточного контура оказывается различной, что объясняется гидродинамикой течения и выбранными размерами зазоров между трубами рядов змеевиков, змеевиками и кожухами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сравнительный анализ параметров противоточного теплообменника, полученных по методике компьютерной гидрогазодинамики и практической методике проектирования теплообменных аппаратов [Текст] / А. В. Жаров, А. А. Павлов, В. В. Власов [и др.] // *Фундаментальные исследования*. – Пенза : Изд-во ООО ИД «Академия Естествознания», 2013. – Вып. 2013-3(11). – С. 423–429. – ISSN 1812-7339.
2. Солонин, В. И. Моделирование теплообмена в змеевиковом теплообменнике применительно к реакторной установке «УНИТЕРМ» [Текст] / В. И. Солонин, А. А. Сатин // *Наука и Образование / МГТУ им. Н. Э. Баумана*. – М. : Сетевое научное издание, 2014. – № 10. – С. 398–412. – ISSN 1994-0448.
3. Бережная, О. К. Моделирование теплогидравлических процессов и разработка методики обобщения данных по эффективным теплообменникам [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Московский гос. техн. ун-т. – М., 2005. – 166 с.
4. Wang, L. Plate heat exchangers: design, applications and performance [Text] / L. Wang, B. Sundén, R. M. Manglik. – Great Britain : WIT Press, 2007. – 288 p. – ISBN 978-1-85312-737-3.
5. Олексюк, А. О. Математическая модель расчета теплообменников змеевикового типа для независимых систем отопления и горячего водоснабжения [Текст] / А. О. Олексюк, И. Г. Шитикова, А. А. Горделюк // *Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури*. – 2012. – Вип. 2012-2(94) : *Інженерні системи та техногенна безпека*. – С. 70–75.
6. Олексюк, А. О. Конструктивный расчет теплообменника змеевикового типа для систем отопления и горячего водоснабжения [Текст] / А. О. Олексюк, И. Г. Шитикова, А. А. Горделюк // *Сучасне промислове та цивільне будівництво*. – 2012. – Т. 8, № 1. – С. 37–44.
7. 81831 Украина, МПК (2013.01), F 24 D 11/00. Многоконтурный теплообменный аппарат змеевикового типа для независимых систем отопления и горячего водоснабжения [Текст] / А. О. Олексюк, И. Г. Шитикова ; собственник патента И. Г. Шитикова. – № u 2013 01303 ; заявл. 04.02.2013 ; опубл. 10.07.2013, Бюл. № 13. – 4 с.

Получено 06.10.2014

**А. О. ОЛЕКСЮК, І. Г. ШИТІКОВА**  
**МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООБМІНУ В ТЕПЛООБМІННИКУ**  
**ЗМІЄВИКОВОГО ТИПУ ДЛЯ НЕЗАЛЕЖНИХ СИСТЕМ ОПАЛЕННЯ ТА**  
**ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ**  
 Донбаська національна академія будівництва і архітектури

У статті розглядається моделювання процесу теплообміну в багатоконтурному теплообміннику змієвидного типу, ізолюваного шаром пінополіуретану і ПЕТФ напиленням, для незалежного приєднання систем опалення та гарячого водопостачання. Показані особливості перебігу потоків в міжтрубному просторі, їх вплив на теплообмін і температуру теплоносіїв першого і проміжних контурів. Представлені рисунки розподілу тепломасообмінних потоків в змієвиках. Проводиться порівняння і аналіз результатів, отриманих з використанням моделей.

**підігрівально-акумуляторна установка, теплообмінний апарат, триконтурний теплообмінник, система незалежного теплопостачання**

ANATOLIY OLEKSIUK, IRINA SHITIKOVA  
MODELLING OF THE HEAT EXCHANGE IN THE HEAT EXCHANGER OF A  
COILED TYPE FOR THE INDEPENDENT HEATING AND HOT WATER SUPPLY  
SYSTEMS

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Modelling of the heat exchange process in the multicircuit heat exchanger of the coiled type, isolated with a polyurethane layer and PTEF evaporation for the independent joining of the heating and hot water supply systems, is examined in the present article. The peculiarities of the currents flow in the intertubular space, their influence on the heat exchange and temperatures of the first and intermediate circuits heat carriers are shown. The images of the heat and mass transfer currents in the coils are represented, the results, received with the patterns usage, are being compared and analyzed.

**reheating battery-driven unit, heat-exchanging apparatus, three-circuit heat exchanger, independent heat supply system**

**Олексик Анатолій Олексійович** – доктор технічних наук, професор кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції Донбаської національної академії будівництва і архітектури, член спеціалізованої вченої ради 12.085.02 ДонНАБА. Наукові інтереси: теорія, розрахунок та проектування систем теплопостачання з індивідуальними тепловими пунктами і багато-контурними теплообмінниками.

**Шитикова Ірина Геннадіївна** – викладач Донецького коледжу будівництва та архітектури. Наукові інтереси: енерго-ресурсозбереження в системах ТГВ.

**Олексюк Анатолий Алексеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, член специализированного ученого совета Д 12.085.02 ДонНАСА. Научные интересы: теория, расчет и проектирование систем теплоснабжения с индивидуальными тепловыми пунктами и многоконтурными теплообменниками.

**Шитикова Ирина Геннадиевна** – преподаватель Донецкого колледжа строительства и архитектуры. Научные интересы: энергоресурсосбережение в системах ТГВ.

**Oleksiu Anatoliy** – DSc (Eng.), Professor, Heat, Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Member of the specialized scientific Council D 12.085.02 DonNASA. Scientific interests: theory, calculation and designing energy recourse saving heat supply systems with individual heat points and multicircuit transformations.

**Shitikova Irina** – Competitor degree. Teacher of Donetsk College of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: energy resource in the systems HGSV.

УДК 628.35

**В. И. НЕЗДОЙМИНОВ**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## **РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ АЭРОТЕНКА С ЗАТОПЛЕННОЙ ЭРЛИФТНОЙ СИСТЕМОЙ АЭРАЦИИ**

Предложены основные расчетные зависимости аэротенка с затопленной эрлифтной системой аэрации для очистки городских сточных вод от органических загрязнений и минерального азота.

**эрлифт, окислительная мощность, окислительная способность, концентрация кислорода**

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Повышение эффективности очистки городских и большинства промышленных сточных вод от органических загрязнений и соединений азота непосредственно связано с повышением интенсивности массообменных процессов в биологическом реакторе с активным илом и совершенствование системы аэрации.

### **АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ**

В большинстве случаев для очистки сточных вод используются аэротенки различной конструкции с отдельно расположенными вторичными отстойниками, глубина которых не превышает 5 м. Поэтому в аэрационном сооружении такого типа сложно достигать высокой степени использования кислорода воздуха и повышенной интенсивности массообмена.

Современные исследования в области биологической очистки сточных вод показали, что наиболее эффективными признаны эрлифтные реакторы (ALR) [1, 2] с большой глубиной заложения при малом поперечном сечении. Первые эрлифтные реакторы были запатентованы во Франции в 1955 году [3]. С этого времени опубликовано достаточно большое количество публикаций на эту тему, но крупномасштабных исследований эрлифтных реакторов в промышленных условиях не проводилось. Практически все исследования [2, 4–6] проводились в лабораторных условиях со свободноплавающими и прикрепленными микроорганизмами [7].

По эффективности аэрации эрлифтные реакторы относятся к пневматическим системам аэрации. Степень использования кислорода воздуха достигает 15 %. В эрлифтах ALR имеются зоны или каналы, по которым движется жидкость по замкнутому контуру. Зоны отделены перегородкой, которая образует зазоры у дна и у поверхности. В одну из зон подается воздух для создания газлифтного эффекта, обеспечивающий движение жидкости по замкнутому контуру. Наличие перегородок в эрлифтных биологических реакторах позволяет эффективно перемешивать жидкость с активным илом в сооружении и обеспечивать создание зон с низкой концентрацией кислорода. Биохимическая способность активного ила к окислению органических веществ и азота аммонийных соединений не ухудшается. Эрлифтные реакторы обычно делятся на два типа в зависимости от структуры потока [9].

Реакторы IL-ALR с внутренней циркуляцией представляют собой емкость с перегородками, служащими для отделения восходящего потока от нисходящего. Реакторы EL-ALR с внешней циркуляцией отличаются наличием дополнительных горизонтальных трубопроводов или широких перегородок, которые влияют на формирование гидродинамической структуры потоков. У этих типов реакторов отсутствует верхняя зона интенсивного перемешивания. Эрлифтный реактор с внутренней циркуляцией считается более эффективным с точки зрения протекания массообменных процессов диффузионного растворения кислорода.

Разновидностью эрлифтного реактора с внутренней циркуляцией считается эрлифт с затопленной системой аэрации, разработанный в ДонНАСА [10]. Несомненными преимуществами эрлифта с затопленной системой аэрации являются высокая степень растворения кислорода, отсутствие вращающихся деталей, простота, надежность и долговечность конструкции. В эрлифтных биореакторах для аэрирования и циркуляции применяется система пневматической аэрации с глубиной аэрирования жидкости 5 м. В эрлифтных реакторах создаются благоприятные условия для одновременного культивирования аэробных гетеротрофных микроорганизмов, нитрифицирующих и денитрифицирующих микроорганизмов.

Для широкого внедрения эрлифтных биореакторов в практику очистки сточных вод необходимы расчетные зависимости окислительной способности аэрационной системы и окислительной мощности аэробного активного ила с учетом площади аэротенка и затопленного эрлифта.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА ИССЛЕДОВАНИЙ

Концентрация кислорода в биологическом реакторе с затопленным эрлифтом определяется, с одной стороны, окислительной способностью системы аэрации (ОС), а с другой – окислительной мощностью (ОМ) активного ила. В случае, если скорость потребления кислорода микроорганизмами активного ила меньше скорости растворения  $ОМ > ОС$ , концентрация кислорода в сооружении будет снижаться. И, наоборот, при условии  $ОМ < ОС$  концентрация кислорода будет возрастать, достигая некоторого максимального значения. При близких значениях ОМ и ОС в биореакторе с затопленной эрлифтной системой аэрации образуются в верхней части аэробные зоны, а в нижней анаэробные зоны. Падение кислорода по глубине сооружения определяется скоростью его потребления гетеротрофными аэробными микроорганизмами и нитрифицирующими в объеме нисходящего потока. В свою очередь, при фиксированной глубине сооружения объем зон нисходящего потока связан с площадью этого потока.

Отношение площади затопленного эрлифта и биореактора  $\omega_{Эрл} / \omega_{Аэр}$  находится из условия  $ОС = ОМ$ . Окислительная способность аэрационной системы равна:

$$ОС = Q_{\Gamma} \cdot M \cdot k_{исп}, \text{ кг } O_2 / \text{ч}, \quad (1)$$

где  $k_{исп}$  – коэффициент использования кислорода воздуха;  
 $M$  – массовая доля кислорода в объеме подаваемого воздуха, г/м<sup>3</sup>;  
 $Q_{\Gamma}$  – расход воздуха, м<sup>3</sup>/ч.

Выразим расход воздуха через интенсивность аэрации и площадь эрлифта:

$$Q_{\Gamma} = I_{Эрл} \cdot \omega_{Эрл}, \text{ получим } ОС = I_{Эрл} \cdot \omega_{Эрл} \cdot M \cdot k_{исп}.$$

Окислительная мощность активного ила:

$$ОМ = \rho \cdot a \cdot W, \text{ кг } O_2 / \text{ч}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – удельная скорость окисления субстрата, г  $O_2$  / кг ила · ч;  
 $a$  – концентрация активного ила кг/м<sup>3</sup>;  
 $W$  – объем аэротенка, м<sup>3</sup>.

Объем аэротенка выразим через его площадь  $\omega_{Аэр}$  и глубину  $h_{Аэр}$ :

Уравнение (2) примет вид:  $ОМ = \rho \cdot a \cdot \omega_{Аэр} \cdot h_{Аэр}$ .

Приравняв уравнения (1) и (2), получим зависимость:

$$\frac{\omega_{Эрл}}{\omega_{Аэр}} = \frac{\rho \cdot a \cdot h_{Аэр}}{M \cdot k \cdot I_{Эрл}}. \quad (3)$$

Формула (3) показывает, что при зафиксированных значениях  $\omega_{Эрл} / \omega_{Аэр}$  и глубины сооружения, уменьшить аэробную зону аэротенка можно путем увеличения концентрации активного ила уменьшением интенсивности аэрации  $I_{Эрл}$ . С технологической точки зрения наиболее предпочтительней регулировать концентрацию кислорода в сооружении следует за счет изменения подачи воздуха в эрлифт.

Концентрация растворенного кислорода  $C_1$  в жидкости, выходящей из затопленного эрлифта, может быть вычислена по формуле:

$$C_1 = \frac{Q_{\Gamma} \cdot M \cdot k_{исп}}{Q_B}, \text{ г/м}^3, \quad (4)$$

В нисходящем потоке концентрация кислорода снижается за счет его потребления аэробными микроорганизмами активного ила. Время падения кислорода в нисходящем потоке с концентрации  $C_1$  до некоторой  $C_0$  определяется зависимостью (5):

$$t = \frac{C_1 - C_0}{\rho \cdot a}, \text{ ч} \quad (5)$$

При культивировании в аэротенке только аэробных гетеротрофных микроорганизмов концентрацию  $C_0$ , в соответствии с требованиями СНиП рекомендуется принимать  $2 \text{ мг/дм}^3$ . Совмещение процессов нитрификации и денитрификации в сооружении с эрлифтной системой аэрации требует снижения величины  $C_0$  до  $0,5 \dots 1,0 \text{ мг/дм}^3$  [11].

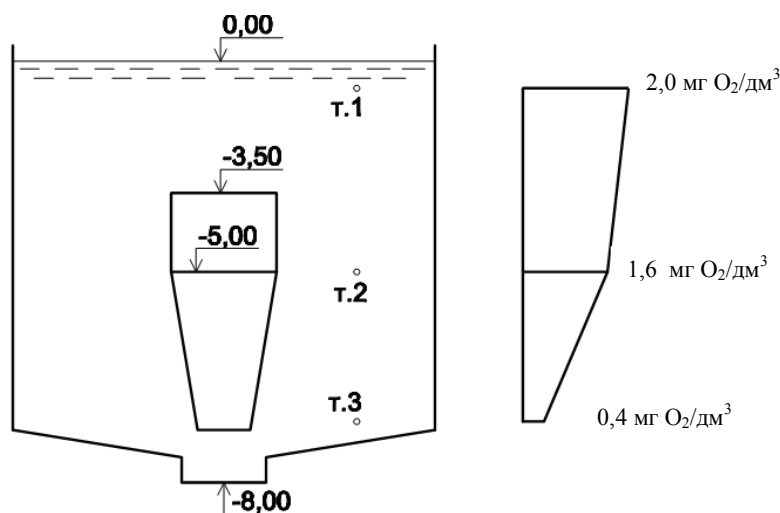
Для подтверждения полученных закономерностей был выполнен комплекс натурных исследований по определению закономерностей распределения кислорода по глубине промышленного аэротенка-отстойника при очистке городских сточных вод с одновременным удалением органических загрязнений и минерального азота.

Измерение растворенного кислорода по глубине аэротенка-отстойника производили при помощи портативного кислородомера АЖА-101МА, предназначенного для проведения анализа непосредственно в аэрационном сооружении.

Измерения проводились при стабильном протекании процесса одновременной нитри-денитрификации в трех характерных точках аэротенка: т. 1 – на глубине  $0,3 \text{ м}$ ; т. 2 – на глубине  $5,0 \text{ м}$ ; т. 3 – на глубине  $7,0 \text{ м}$ . Первая точка расположена в зоне интенсивной аэрации потока, вторая в зоне стабилизации потока и третья в придонной аноксидной зоне.

На рис. 1 показаны значения кислорода в этих точках при подаче сточных вод  $44 \text{ м}^3/\text{ч}$  и расходе воздуха  $Q_r = 125 \text{ м}^3/\text{ч}$ , что соответствует интенсивности аэрации в эрлифте  $I_{\text{эрл}} = 13,9 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$  и подаче эрлифта  $Q_b = 2\,070 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Концентрация активного ила  $a = 2,9 \text{ кг/м}^3$ , зольность ила  $30 \%$ , удельная скорость окисления по БПК  $\rho = 5 \text{ г/(\кг}\cdot\text{ч)}$ .

Экспериментальные данные свидетельствуют том, что по глубине аэротенка концентрация кислорода разнится (рис.). В зоне интенсивной аэрации концентрация кислорода в воде максимальна  $O_2 = 2 \text{ мг/дм}^3$ . Небольшое падение кислорода наблюдается между точкой 1 и точкой 2. Зато резкое падение кислорода прослеживается на глубинах больше  $5 \text{ м}$ . В аэротенке на глубине  $7,0 \text{ м}$  концентрация растворенного кислорода снижается до  $0,4 \text{ мг/дм}^3$ , а на входе в эрлифт концентрация кислорода в воде понижается до  $0,2 \text{ мг/дм}^3$ .



**Рисунок** – Распределение концентраций кислорода по глубине аэротенка при интенсивности аэрации в эрлифте  $16,6 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$ .

Сравним значения кислорода, вычисленные по формулам (4 и 5) с натурным распределением кислорода по глубине аэротенка.

Концентрация кислорода в жидкости, выходящей из затопленного эрлифта:

$$C_1 = \frac{125 \cdot 280 \cdot 0,14}{2\,070} = 2,4 \text{ г/м}^3$$

Время, за которое концентрация кислорода в аэротенке снизится в нисходящем потоке с  $2,4 \text{ г/м}^3$  до  $C_0 = 0,5 \text{ г/м}^3$ :

$$t = \frac{2,4 - 0,5}{6,4 \cdot 4,0 \cdot (1 - 0,3)} = 0,1 \text{ ч или 6 мин.}$$

Вычисленные значения кислорода в характерных точках аэротенка по формулам (4 и 5) практически совпадают с полученными экспериментальными данными.

Параллельно проводились исследования по определению скорости дыхания активного ила в различных точках по глубине опытного аэротенка. Пробы жидкости с активным илом отбирались в верхней части аэротенка (у поверхности)  $V_1$  и на глубине 6 м –  $V_2$ . Скорость дыхания определялась с помощью кислородомера по стандартной методике. Для этого культуральную жидкость помещали в химическую посуду и искусственно при помощи микрокомпрессора доводили концентрацию растворенного кислорода до  $4 \text{ мг/дм}^3$ . После чего определялась кинетика поглощения растворенного кислорода микроорганизмами активного ила и были получены удельные скорости дыхания, которые составили:

$$V_1 = 8 \text{ мг/(г·ч)};$$

$$V_2 = 24 \text{ мг/(г·ч)}.$$

Результаты исследований показали, что активный ил, отобранный из нижней части биореактора, обладает более высокой способностью к потреблению кислорода по сравнению с активным илом у поверхности в зоне аэрации. Это объясняется отсутствием во внутриклеточном веществе микроорганизмов, находящихся в анаэробных условиях, растворенного кислорода. При попадании этих микроорганизмов в аэробные условия происходит не только дыхание, но растворение и проникновение кислорода во внутриклеточную плазму.

## ВЫВОДЫ

1. В аэротенках с затопленной эрлифтной системой аэрации распределение кислорода по глубине сооружения определяется окислительной способностью аэрационной системы и окислительной мощностью аэробных микроорганизмов активного ила.
2. Для определения соотношения площади аэротенка и затопленного эрлифта рекомендуется использовать полученную зависимость 3, а изменение концентраций кислорода по глубине аэротенка – зависимости 4 и 5.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Influence of the baffle clearance design on hydrodynamics of a two riser rectangular airlift reactor with inverse internal loop and expanded gas-liquid separator [Текст] / M. Peter, M. Argyrios, M. Bergougnou, Tang Yu. Jun // Chemical Engineering Journal. – 2006. – 121. – P. 17–26.
2. Kaustubh, M. Hydrodynamics of a novel multi-stage external loop airlift reactor [Текст] / M. Kaustubh, D. Dasb, M. Biswasa // Chemical Engineering Science. – 2006. – 61. – P. 4617–4624.
3. Lefrancois, L. Effetionnements aux procedes de cultures forgiques et de Fermentations industrielles. Brevet D'Invention [Текст] / L. Lefrancois, C. Mariller, J. Mejane. – France, No. 1102200. 1955. – P. 102–200.
4. Lo, Cheng-Shing. Local hydrodynamic properties of gas phase in an internal-loop airlift reactor [Текст] / Cheng-Shing Lo, Shyh-Jye Hwang // Chemical Engineering Journal. – 2003. – 91. – P. 3–22.
5. Blažej, M. Scale influence on the hydrodynamics of an internal loop airlift reactor [Текст] / M. Blažej, M. Kiša, J. Markoš // Chemical Engineering and Processing. – 2004. – 43. – P. 1519–1527.
6. Lin, Tsao-Jen. Studies on hydrodynamics of an internal-loop airlift reactor in gas entrainment regime by particle image analyzer [Текст] / Tsao-Jen Lin, Po-Chou Chen // Chemical Engineering Journal. – 2005. – 108. – P. 69–79.
7. Experiments and simulations of gas-solid flow in an airlift loop reactor [Текст] / Chaoyu Yan, Chunxi Lu, Yiping Fan, Rui Cao, Yansheng Liu // Particuology. – 2011. – 9. – P. 130–138.
8. Blažej, M. Scale influence on the hydrodynamics of an internal loop airlift reactor [Текст] / Blažej, M. Kiša, J. Markoš // Chemical Engineering and Processing. – 2004. – 43. – P. 1519–1527.
9. Нездойминов, В. И. Определение параметров газожидкостной смеси в затопленных эрлифтных системах [Текст] / В. И. Нездойминов, В. С. Рожков // Определение параметров газожидкостной смеси в затопленных эрлифтных системах. Науковий вісник будівництва ХДТУБА. – Харків : ХОТБ АБУ, 2008. – № 49. – С. 131–136.
10. Яковлев, С. В. Биохимические процессы в очистке сточных вод [Текст] / С. В. Яковлев, Т. А. Карюхина. – М.: Стройиздат, 1980. – 200 с.

Получено 30.09.2014



В. І. НЕЗДОЙМІНОВ

РОЗРАХУНКОВІ ЗАЛЕЖНОСТІ АЕРОТЕНКА ІЗ ЗАТОПЛЕНОЮ  
ЕРЛІФТНОЮ СИСТЕМОЮ АЕРАЦІЇ

Донбаська національна академія будівництва і архітектури

Запропоновано основні розрахункові залежності аеротенка із затопленою ерліфтною системою аерації для очистки міських стічних вод від органічних забруднень і мінерального азоту.

**ерліфт, окислювальна потужність, окислювальна здатність, концентрація кисню**

VIKTOR NEZDOYMINOV

CALCULATED ACCORDING TO THE AERATION TANK WITH AIR LIFT  
SUBMERGED AERATION SYSTEM

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

The basic design depending aeration tank with air lift submerged aeration system for municipal wastewater treatment of organic waste and mineral nitrogen has been suggested.

**airlift, oxidizing power, oxidizing ability, concentration of oxy**

**Нездоймінов Віктор Іванович** – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри водопостачання, водовідведення та охорони водних ресурсів Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: біологічна очистка стічних вод.

**Нездойминов Виктор Иванович** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой водоснабжения, водотведения и охраны водных ресурсов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: биологическая очистка сточных вод.

**Nezdoyminov Viktor** – PhD, Associate Professor, Head of Water Supply, Sanitation and Water Conservation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: biological treatment of wastewater.

УДК 621.878.2

**В. Д. ПЕТРАШ, Ю. Н. ПОЛУНИН**

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

## **ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ РАСХОДОВ ВОДЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО И КОММУНАЛЬНО-БЫТОВОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОВ**

Предложена новая система отбора и трансформации энергии отработанных газов вращающихся печей для промышленного теплоснабжения. В результате аналитического исследования установлен модифицированный критерий комплексной оценки ее энергетической эффективности. Установлено, что высокая эффективность преобразования энергетических потоков ( $\varphi = 10...15$ ) при начальной температуре газов  $100^\circ\text{C}$  может быть обеспечена при соотношении расходов отбираемого теплоносителя для технологических нужд и коммунально-бытового назначения в диапазоне  $0,3...0,7$ , а при температуре газов  $300^\circ\text{C}$  ограничивается диапазоном  $\Theta = 0,25...0,45$ .

**термотрансформация, утилизация, вращающиеся печи**

Основным недостатком вращающихся печей в процессе производства цемента и керамзита является крайне низкая эффективность использования энергии первичного топлива (до 45%), потери теплоты с отработанными газами составляют 30...35 %, [1–3], при этом в стоимости конечной продукции топливная составляющая достигает 60 %. Отработанные газы, содержащие наибольший резерв вторичных энергоресурсов в теплотехнологическом процессе производства строительных материалов, отличаются характерной пылегазовой компонентой, сравнительно низкой температурой (до  $150...250^\circ\text{C}$ ) и большими расходами. Они обладают мощным теплоэнергетическим потенциалом, который в настоящее время практически не используется для теплотехнологического и коммунально-бытового теплоснабжения.

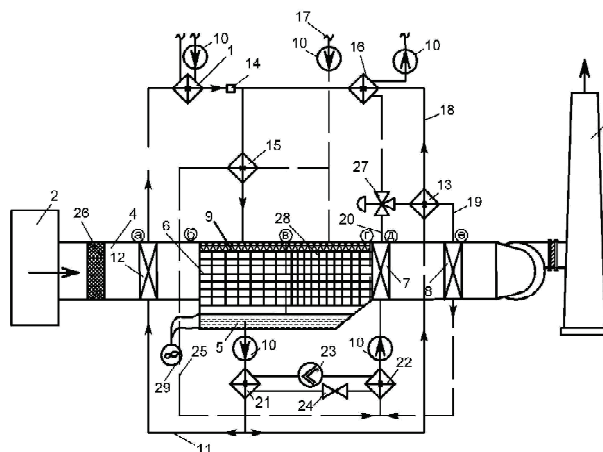
Приведенный анализ сопоставления пылевого и химического состава отработанных газов указывает на существенное отличие их по аналогичным показателям с уходящими газами традиционных районных котельных и ТЭЦ, работающими на газовом топливе. При этом химический состав отработанных газов [4] во многих случаях по содержанию оксидов азота меньше на 10...15 %, а по оксидам серы на 8...13 %, за исключением случаев повышенного содержания указанных компонентов в исходной структуре обрабатываемого материала.

Анализ известных систем отбора теплоты из отработанных газов с позиции энергосбережения свидетельствует о необходимости поиска методов более глубокого их охлаждения с одновременной возможностью повышения температурного уровня нагреваемой среды для абонентских систем. При этом в процессе охлаждения отработанных газов экономия теплоты позволяет сократить до  $1/3$  энергии традиционно сжигаемого первичного топлива. Одним из рациональных способов отбора теплоты из отработанных газов реализуется в контактно-рекуперативных системах по разработкам [5–10]. В работе [11] акцентируется внимание на перспективность энергосбережения в технологии производства строительных материалов во вращающихся печах на основе теплонасосных технологий.

Перспективным направлением в решении поставленной задачи представляется технология комбинированного контактно-рекуперативного отбора теплоты с минимизацией затрат на парокompрессионную термотрансформацию энергетических потоков. Изложенный подход открывает возможность

повышения температурного потенциала абонентского теплоносителя, увеличения общего объема утилизируемой теплоты, а также способствует защите окружающей среды за счет снижения теплового загрязнения и уменьшения количества вредных выбросов в атмосферу.

Авторами предложена приведенная на рис. 1 система, отличающаяся патентной новизной [12], которая работает следующим образом. После традиционной очистки от пыли отработанные газы из вращающейся печи по каналу 2 поступают в фильтр тонкой очистки 26, дальше направляются в рекуперативный теплообменник 12 для предварительного их охлаждения в «сухом» режиме. Затем газы поступают в первую контактную камеру 6 предложенной структуры [13] для предварительного охлаждения и увлажнения, а затем – во вторую камеру 28 для более глубокого их охлаждения с возможностью нагрева воды до соответствующего значения температуры «мокрого термометра» в каждой из них. В первой камере 6 контактное взаимодействие потоков происходит при повышенной температуре воды после теплообменника 15, а во второй камере 28 обеспечивается более глубокое их доохлаждение при температуре исходной холодной воды в трубопроводе 17. Затем газы проходят рекуперативный теплообменник 7, в который поступает холодная вода с предельно низкой температурой после испарителя 22 парокомпрессионного термотрансформаторного контура. В результате происходит глубокое охлаждение парогазовой смеси до 15–20 °С в режиме конденсации влаги с соответствующим выделением теплоты парообразования. Для предотвращения выпадения конденсата в дымовой трубе теплообменник 8 обеспечивает незначительный нагрев охлажденного газа, после чего он выходит в атмосферу с температурой 20...25 °С.



**Рисунок 1** – Схема системы контактно-рекуперативного отбора и трансформации теплоты отработанных газов вращающихся печей для промышленного теплоснабжения: 1 – теплообменник нагрева воды для отопительно-вентиляционных систем; 2 – газоход; 3 – дымовая труба; 4 – газоход после тонкой очистки; 5 – поддон; 6 – первая контактная камера; 7 – теплообменник доохлаждения газа; 8 – подогреватель; 9 – распределитель; 10 – циркуляционные насосы; 11, 18, 19, 20 – трубопроводы; 12 – теплообменник предварительного охлаждения газов; 13, 15, 16 – теплообменники; 14 – дроссель; 17 – трубопровод исходной холодной воды; 21 – конденсатор; 22 – испаритель; 23 – компрессор; 24 – дроссельный вентиль; 25 – трубопровод подачи воды на горячее водоснабжение; 26 – фильтр тонкой очистки газа; 27 – трехпозиционный регулятор расхода жидкости; 28 – вторая контактная камера; 29 – шнек.

Исходная холодная вода по трубопроводу 17 поступает во вторую камеру контактного взаимодействия 28 для более глубокого охлаждения газов. Часть потока холодной воды из трубопровода 17 по циркуляционному трубопроводу 25 после предварительного нагрева в рекуперативном теплообменнике 15 поступает в испарительный теплообменник 22 термотрансформаторного контура совместно с рециркуляционным потоком незначительно подогретой воды после теплообменника 8.

В теплообменнике 15 из охлаждаемой воды перед распределителем 9 предусмотрен частичный отбор циркулирующей воды по трубопроводу 25 для последующей передачи ее в испарителе 22 в термотрансформаторном цикле для дальнейшего нагрева поступающей воды из поддона 5 в конденсаторном теплообменнике 21. Для повышения надежности работы как оросительных камер, так и всей системы водно-шламовая смесь с повышенной концентрацией удаляется шнековой системой 29 для последующего применения на исходной стадии замкнутого технологического цикла.

Вода после контактного взаимодействия с газом из поддона 5 под действием циркуляционного насоса 10 поступает в конденсаторный теплообменник 21, где происходит дальнейший термотрансформаторный нагрев ее после контактной камеры. Здесь осуществляется догрев воды после контактного взаимодействия за счет отбираемой теплоты в испарителе 22 из воды, поступающей после теплообменников 8, 13 и 15, а также части приводной мощности в тепловом эквиваленте, расходуемой на привод компрессора 23. В испарителе 22 теплоноситель охлаждается до предельно низкой температуры, обеспечивая высокоэффективную работу теплообменника 7 для эффективного охлаждения парогазовой смеси в режиме конденсации. После конденсатора вода с повышенной температурой разделяется по двум параллельно работающим рециркуляционным контурам. Первая часть общего потока после прохождения через рекуператор предварительного охлаждения газов 12 направляется в теплообменник 1 для нагрева теплоносителя отопительно-вентиляционных систем. После снижения температуры в теплообменнике 15 греющая вода поступает в первую контактную камеру. Вторая часть подогретой воды в конденсаторе 21 после теплообменников 13 и 16 поступает в тот же распределитель 9.

Охлажденная вода после испарителя 22 термотрансформаторного контура с помощью насоса 10 поступает в теплообменник 7 для более глубокого охлаждения влагонасыщенных газов после второй контактной камеры. Частично нагретая вода в теплообменнике 7 после прохождения по трубопроводу 20 с регулятором 27 догревается в теплообменнике 16 и поступает в систему горячего водоснабжения. Рециркуляционная часть воды после нагрева в теплообменнике 13 по трубопроводу 19 проходит в теплообменник 8, а затем возвращается в испаритель 22 термотрансформаторного контура.

Целью аналитического исследования явилось установление зависимостей для оценки энергетической эффективности трансформации энергетических потоков контактно-рекуперативного теплообмена в процессе охлаждения отработанных газов на вышеизложенной основе.

Поступающий из печи газ с начальной температурой (100...300 °C) после дополнительной тонкой очистки с расходом сухой части и паров нагревает воду в рекуперативном теплообменнике предварительного его охлаждения 12. При этом отбираемый тепловой поток  $Q_{по}$  в режиме «сухого» охлаждения газа определяется по зависимости

$$Q_{по} = G_r \cdot [C_r \cdot (t_{r,a} - t_{r,b}) + d_n \cdot (C_{n,at_{n,a}} - C_{n,bt_{n,b}})], \text{ Вт}, \quad (1)$$

где  $C_r$  и  $C_n$  – средняя изобарная теплоёмкость газов и паров в рассматриваемых сечениях «а» и «б», Дж/(кг·°C);  
 $t_r$  и  $t_r$  – начальная и конечная температура предварительного охлаждения газа и паров в соответствующих сечениях, °C;  
 $d_n$  – влагосодержание газа, кг/кг.

В результате последующего взаимодействия охлажденного газа с водой его теплота воспринимается нагреваемой средой в первой и во второй контактных камерах. Общий тепловой поток охлаждения газа в контактной камере представляется в виде теплоты его сухой компоненты, паров и сконденсировавшейся их части в соответствии с уравнениями

$$Q_{кк} = G_r \cdot [C_{r,b} \cdot t_{r,b} - C_{r,g} \cdot t_{r,g}] + (d_{n,b} \cdot i_{n,b} - d_{n,g} \cdot i_{n,g}) + (d_{n,b} - d_{n,g}) \cdot C_{ж} \cdot t_{ж}, \quad (2)$$

где  $C_r$ ,  $C_n$ ,  $C_{ж}$  – теплоёмкости соответственно сухой компоненты газа, паров и сконденсировавшейся их части в соответствующих сечениях «б» и «г» до и после контактной камеры, Дж/(кг·°C);  
 $t_r$ ,  $t_n$ ,  $t_{ж}$  – температуры соответственно сухой компоненты газа, паров и сконденсировавшейся их части в соответствующих сечениях «б» и «г» до и после контактной камеры, °C;  
 $d_n$  – влагосодержание газа после контактной камеры, кг/кг;  
 $i_r$  и  $i_n$  – энтальпия газа и паров соответственно сухой компоненты газа, паров и сконденсировавшейся их части до и после контактной камеры, Дж/кг.

Тепловой поток доохлаждения газа в теплообменнике 7 после контактной камеры определяется по зависимости

$$Q_{го} = G_r \cdot [C_r(t_{r,g} - t_{r,d}) + (d_{n,g} \cdot i_{n,g} - d_{n,d} \cdot i_{n,d}) + (d_{n,g} - d_{n,d}) \cdot C_{ж} \cdot t_{ж}], \quad (3)$$

где  $C_r$ ,  $C_{ж}$  – теплоёмкость газа и сконденсировавшегося пара в соответствующих сечениях «г» и «д», Дж/(кг·°C);

$t_r$  и  $t_{ж}$  – температура газа и сконденсировавшегося пара в соответствующих сечениях «Г» и «Д», °C;  
 $d_n$  – влагосодержание пара в соответствующих сечениях, кг/кг.

Закономерность распределения нагреваемой воды в рассматриваемых подсистемах при взаимодействии ее с низкотемпературным газом определяется структурно-функциональной взаимосвязью основных элементов системы, рис. 1. Очевидно, что расход воды во второй контактной камере  $G_{к2} = G_{хв} - G_{гв}$ , а в первой  $G_{к1} = G_n$ . Представим расход воды, поступающей из поддона на исходный цикл технологического процесса  $G_{техн}$  в виде  $\Theta \cdot G_n$ , откуда следует, что

$$G_{техн} = \Theta \cdot G_n = G_{хв} - G_{гв} + G_{конд}, \text{ кг/с}, \quad (4)$$

где  $G_{конд}$  – общий расход сконденсировавшихся паров в результате непосредственного взаимодействия отработанного газа с водой в контактной камере и доохлаждения в теплообменнике 7, кг/с.

Соотношение расходов воды в системе отопления  $G_{ов}$  и на горячее водоснабжение  $G_{гв}$  представляется в виде  $\beta = G_{ов}/G_{гв}$ .

Обозначим соотношение расходов отработанного газа  $G_r$  к общему расходу нагреваемой воды в первой  $G_{к1}$  и второй  $G_{к2}$  контактных камерах в виде

$$a = \frac{G_r}{G_{к1} + G_{к2}}, \quad (5)$$

откуда следует, что расход отработанного газа представляется в более общем виде

$$G_r = a \cdot (\beta \cdot G_{гв} + G_{хв}). \quad (6)$$

Таким образом, тепловой поток нагрева воды в конденсаторе термотрансформаторного контура  $Q_k$  приобретает вид

$$Q_k = (1 + \beta) \cdot G_{гв} \cdot C_w \left\{ t_r + \Delta t - \frac{a}{C_w} \left( 1 + \frac{G_{хв}}{\beta \cdot G_{гв}} \right) \cdot [C_r \cdot \Delta t_{по} \cdot (t_r - t_{yx}) + \right. \\ \left. + d_n (C_n \cdot t_n - C_{п,6} (t_r - \Delta t_{по} \cdot (t_r - t_{yx}))) \right] - t_m \}, \quad (7)$$

где  $\Delta t$  – температурный перепад между конечными температурами греющей и нагреваемой среды в поверхностном теплообменнике, °C;

$\Delta t_{по}$  – относительное снижение температуры газа в теплообменнике предварительного охлаждения;

$t_m$  – температура воды в поддоне, определенная на основе [14] и графического построения процессов на I-d диаграмме влажного газа, °C;

$t_{yx}$  – температура уходящего отработанного газа, °C.

Для определения энергии охлаждения воды в испарителе термотрансформаторного контура и газа после контактной камеры предварительно был установлен температурный потенциал теплоносителя для горячего водоснабжения в характерных точках системы. На изложенной основе установлена зависимость для определения энергии охлаждения воды в испарителе и газа после контактной камеры.

В результате зависимость для определения энергии охлаждения циркулирующей воды через испаритель термотрансформаторного контура приобретает вид

$$Q_n = G_{гв} \cdot C_w \left\{ \left[ \left( \frac{G_{гв}}{G_{хв}} + j \right) \cdot \left[ t_{н,к} + \frac{a}{(1+j) \cdot C_w} \left( \beta + \frac{G_{хв}}{G_{гв}} \right) \cdot (C_r (t_r - (1+\mu) \cdot (t_r - t_{yx})) - 2t_{г,д} + m \cdot t_{в,г}) \right) + \right. \right. \right. \\ \left. \left. + [C_n \cdot d_n (t_r - (1+\mu) \cdot (t_r - t_{yx})) - 2t_{г,д} + m \cdot t_{в,г}) - C_{ж} \cdot t_{ж} (d_{п,г} - d_{п,д})] + \frac{G_{гв}}{G_{хв}} (\beta \cdot t_o + t_{гв}) - (1+j) t_{н,к} \right] \right\}, \quad (8)$$

где  $j$  – рециркуляционная часть общего расхода теплоносителя в системе горячего водоснабжения, проходящая через теплообменник 8 для предотвращения выпадения конденсата из охлажденного газа при дальнейшем его контакте с поверхностями газопроводов и выбросной трубы.

Взаимосвязь расходов исходной холодной воды  $G_{хв}$  и на горячее водоснабжение  $G_{гв}$  с учетом ранее принятого соотношения (4)  $G_{техн} = \Theta \cdot G_{п}$  представляется как

$$G_{хв} = G_{гв} \cdot [1 + \Theta(1 + \beta)] \quad (9)$$

Воспринятый тепловой поток в конденсаторе  $Q_k$  определяется тепловой мощностью испарителя  $Q_n$ , а также мощностью в тепловом эквиваленте, затраченной на привод компрессора  $W$  в процессе термотрансформации энергетических потоков [15], откуда следует, что  $Q_k = Q_n + W$ . Исходя из определения действительного коэффициента преобразования и соответствующего соотношения энергетических потоков следует, что

$$\varphi = \frac{Q_k}{W} = \left(1 - \frac{Q_n}{Q_k}\right)^{-1} \quad (10)$$

После подстановки соответствующего соотношения тепловых потоков конденсатора  $Q_k$  и испарителя  $Q_n$  в зависимость (10), анализ эффективности преобразования энергетических потоков в анализируемой системе представляется возможным производить по уравнению в окончательном виде

$$\varphi = \{1 - [(A \cdot B + B_1) - B_2] \cdot B^{-1}\}^{-1}, \quad (11)$$

где комплексы  $A$ ,  $B$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  и  $B$  учитывают соответствующую взаимосвязь исходных и режимных параметров в испарителе и конденсаторе в соответствующем виде:

$$A = \left( j + \frac{1}{1 + \Theta(1 + \beta)} \right);$$

$$B = \left[ t_{н,к} + \frac{a}{(1+j) \cdot C_{в}} \cdot (1 + \beta + \Theta(1 + \beta)) \cdot \{ t_{г} - (1 + \mu) \cdot (t_{г} - t_{yx}) - 2t_{г,д} + m \cdot t_{н,д} \} \times (C_{г} + C_{п} \cdot d_{п}) - C_{ж} \cdot t_{ж} (d_{п,г} - d_{п,д}) \right];$$

$$B_1 = \frac{\beta \cdot t_{г,о} + t_{гв}}{1 + \Theta(1 + \beta)}; \quad B_2 = (1 + j) \cdot t_{н,к};$$

$$B = (1 + \beta) \cdot \left\{ t_{г,от} + \Delta t - \frac{a}{C_{в}} \left( \frac{1 + \Theta + \beta(1 + \Theta)}{\beta} \right) \times [C_{г} \cdot \Delta t_{по} (t_{г} - t_{yx}) + d_{п} (C_{п} \cdot t_{п} - C_{п,б} (t_{г} - \Delta t_{по} (t_{г} - t_{yx})))] - t_{м} \right\}$$

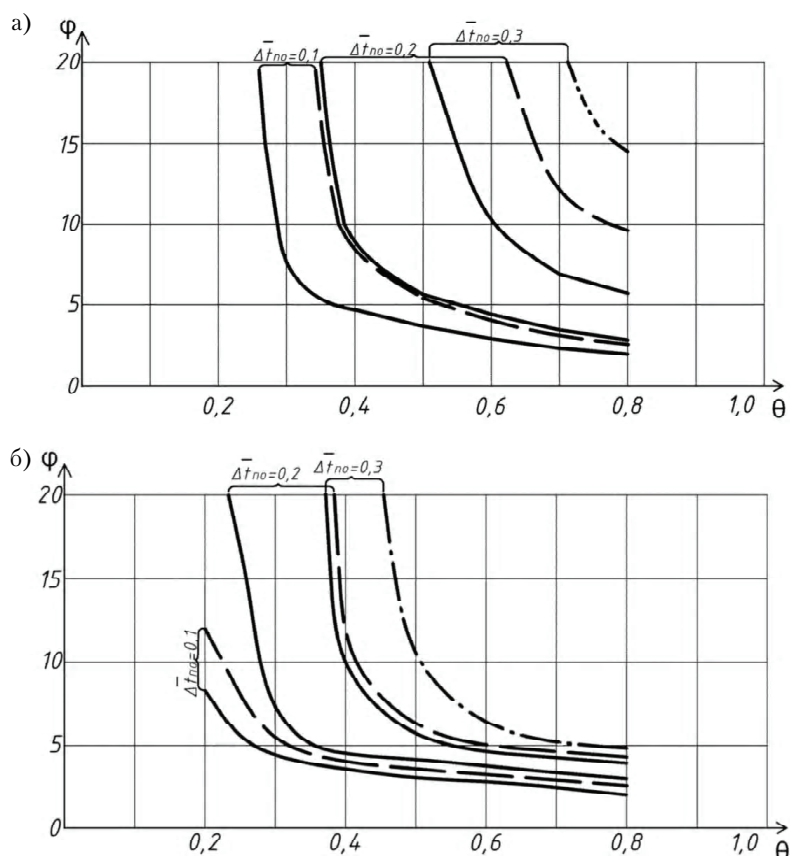
Из уравнения (11) следует, что коэффициент преобразования как модифицированный критерий комплексной оценки эффективности трансформации энергетических потоков в предложенной системе, учитывая ее исходные параметры и режимные условия работы структурных подсистем, зависит прежде всего от соотношения температур и расходов греющей и нагреваемой среды.

Отбор нагретой воды из поддона контактной камеры является рациональным по энерготехнологическим показателям для использования на исходной стадии с температурой 45...50 °С в основном технологическом цикле. Кроме того, отбор воды обеспечивает надежную работу самой контактной камеры и соответствующих систем за счет непрерывной регенерации нагреваемой среды с остаточными пылегазовыми фракциями отработанного газа после его предварительной тонкой очистки.

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента преобразования энергии при начальной температуре газов 100 и 300 °С от соотношения расходов теплоносителей технологического и коммунально-бытового назначения при соответствующих начальных температурах отработанных газов при различной степени их предварительного охлаждения.

При построении графиков для реальных значений исходных параметров отработанного газа и жидкости, соответствующих их термодинамическим характеристикам, а также результатов анализа графического построения процессов на  $I-d$  диаграмме в последующих расчетах принимались следующие данные:  $j = 0,2$ ;  $t_{н,к} = 5$  °С;  $a = 0,5-1,0-1,5$ ;  $\beta = 0,9-0,5-0,7$ ;  $\mu = 0,04$ ;  $t_{г} = 100; 300$  °С;  $t_{г,2} = 20$  °С;  $m = 1$ ;  $t_{м} = 44$  °С;  $C_{п} = 1\ 100$  Дж/(кг·°С);  $C_{ж} = 4\ 200$  Дж/(кг·°С);  $C_{г} = 1\ 026$  Дж/(кг·°С);  $t_{ж} = 35$  °С;  $d_{п} = 0,04$  кг/кг;  $d_{п} - d_{к} = 0,02$  кг/кг;  $t_{yx} = 25$  °С;  $t_{г,о} = 70$ ;  $t_{гв} = 55$  °С;  $\Delta t = 5$  °С;  $t_{по} = 95$  °С;  $C_{в} = 4\ 200$  Дж/(кг·°С);  $C_{г} = 1\ 026$  Дж/(кг·°С);  $C_{п} = 1\ 100$  Дж/(кг·°С);  $C_{yx} = 1\ 009$  Дж/(кг·°С);  $\Delta t_{аб} = 0,2$  °С;  $\Theta = 0,5$ ;  $t_{п} = 100$  °С;  $C_{п,б} = 1\ 026$  Дж/(кг·°С).

Из представленных графиков рис. 2а следует, что на эффективность преобразования существенно влияет начальная температура отработанных газов, а также степень предварительного их охлаждения в теплообменнике соответствующего назначения. Высокая эффективность преобразования энергетических потоков ( $\varphi = 10...15$ ) при начальной температуре газов 100 °С может быть обеспечена при соотношении расходов отбираемого теплоносителя для технологических нужд и коммунально-бытового назначения в диапазоне 0,3...0,7, учитывая рациональную степень предварительного охлаждения газового потока. Вместе с тем при начальной температуре отработанных газов 300 °С, рис. 2б,



**Рисунок 2** – Зависимость коэффициента преобразования от соотношения потребляемой воды на технологическое и коммунально-бытовое теплоснабжение: а) при 100 °С; б) при 300 °С; — — — — — при  $\beta = 0,9$ ; — — — — — при  $\beta = 0,5$ ; — — — — — при  $\beta = 0,7$ .

рациональные значения указанного соотношения ограничивается диапазоном  $\Theta = 0,25...0,45$  с учетом рациональной степени предварительного охлаждения газов.

## ВЫВОДЫ

1. Предложены новый концептуальный подход и соответствующая система энергосбережения на основе контактно-рекуперативного отбора с парокомпрессионной трансформацией теплоты отработанных низкотемпературных газов вращающихся печей для теплотехнологического и промышленного теплоснабжения. Это создает основу для использования мощного потенциала отработанных низкотемпературных газов, энергия которых в настоящее время по существующей теплотехнологии практически не используется. Разработки открывают новые возможности для 20...30 % повышения эффективности использования первичной энергии сжигаемого топлива в печных агрегатах для промышленного и коммунально-бытового теплоснабжения.

2. Установлена зависимость коэффициента преобразования, которая позволяет производить оценку эффективности совместной работы контактно-рекуперативной и абонентских систем с термотрансформацией энергетических потоков. Она показывает, что на единицу приводной мощности в работе компрессора отбор теплоты из охлаждаемого низкотемпературного газа достигает 10...15 в зависимости от исходных параметров и режимных условий работы предложенной системы.

3. Установлено, что высокая эффективность преобразования энергетических потоков ( $\Phi = 10-15$ ) при начальной температуре газов 100 °С может быть обеспечена при соотношении расходов отбираемого теплоносителя для технологических нужд и коммунально-бытового назначения в диапазоне  $\Theta = 0,3...0,7$ , а при температуре газов 300 °С ограничивается диапазоном  $\Theta = 0,25...0,45$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ходоров, Е.И. Печи цементной промышленности [Текст] / Е. И. Ходоров. – Л. : Изд-во Литературы по строительству, 1968. – 456 с.
2. Древицкий, Е. Г. Повышение эффективности работы вращающихся печей [Текст] / Е. Г. Древицкий, А. Г. Добровольский, А. А. Коробок. – М. : Стройиздат, 1990. – 225 с.
3. Онацкий, С. П. Производство керамзита [Текст] / С. П. Онацкий. – М. : Стройиздат, 1987. – 333 с.
4. Нильсен О. Руководство ЕМЕП/ЕАОС по инвентаризации выбросов [Текст] / Оле-Кеннет Нильсен. – Luxembourg : Publication office of the European Union, 2013. – 37 с.
5. Аронов, И. З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа [Текст] / И. З. Аронов. – Л. : Недра, 1978. – 280 с.
6. А. с. 1776907 СССР, F 22 В 1/18. Установка для утилизации тепла и очистки дымовых газов [Текст] / С. М. Комков (СССР). – №4884415/06 ; заявл. 12.10.1990 ; опубл. 23.11.1992, Бюл. № 43. – 3 с.
7. Эффективность систем утилизации теплоты отходящих газов энергетических установок различного типа [Текст] / Н. М. Фиалко, Ю. В. Шеренковский, А. И. Степанова, Р. А. Навродская // Промышленная теплотехника. – 2008. – Т. 30, № 3. – С. 68–76.
8. Полунин, М. М. Совместная работа теплоутилизующего комплекса обжиговой вращающейся печи и теплопотребляющих систем [Текст] / М. М. Полунин, В. Д. Петраш // Известия вузов. Строительство. – Новосибирск, 1996. – № 11. – С. 90–94.
9. Комплексная система утилизации тепла уходящих газов [Текст] / Л. Г. Семенюк, А. А. Михайлов, О. Б. Шипилов [и др.] // Промышленная энергетика. – 1991. – № 2. – С. 38–40.
10. Губарь, В. Ф. Пути и методы утилизации тепла отходящих газов печей обжига клинкера при мокром способе газоочистки [Текст] / В. Ф. Губарь, А. В. Лукьянов, А. М. Гушин // Новые технологические решения для строительной промышленности Донбасса : Сб. научных трудов / Под ред. УМК ВО. – К. : УМК ВО, 1989. – С. 140.
11. Михайлов-Вагнер, А. Современные энергосберегающие технологии и возможность их применения в цементной промышленности России [Текст] / А. Михайлов-Вагнер // Цемент и его применения. – 1997. – № 4. – С. 9–14.
12. Пат. 100923 Україна, МПК F27В 9/00 F23J 15/00 F24D 17/02 F22В 1/18 F25В 27/02. Термотрансформаторна система відбору теплоти з відпрацьованих газів для промислового теплопостачання [Текст] / Ю. Н. Полунін, В. Д. Петраш ; власник Одеська державна академія будівництва та архітектури. – № а 2011 05497 ; заявл. 29.04.2011 ; опубл. 11.02.2013, Бюл. № 9. – 4 с.
13. Пат. 73654 Україна, МПК F23J 15/00 B01D 47/06 F28D 21/00. Тепломасообмінний апарат для відбору теплоти з низькотемпературних газів [Текст] / В. Д. Петраш, Ю. Н. Полунін ; власник Одеська державна академія будівництва та архітектури. – № у 2011 09026 ; заявл. 19.07.2011 ; опубл. 10.10.2012, Бюл. № 19. – 3 с.
14. Соснин, Ю. П. Высокоэффективные газовые контактные водонагреватели [Текст] / Ю. П. Соснин, Е. Н. Бухаркин. – М. : Стройиздат, 1988. – 376 с.
15. Мартыновский, В. С. Циклы, схемы и характеристики термотрансформаторов [Текст] / В. С. Мартыновский. – М. : Энергия, 1977. – 280 с.

Получено 07.10.2014

В. Д. ПЕТРАШ, Ю. М. ПОЛУНІН  
ВПЛИВ СПІВВІДНОШЕННЯ ВИТРАТ СПОЖИВНОЇ ВОДИ НА  
ТЕХНОЛОГІЧНЕ ТА КОМУНАЛЬНО-ПОБУТОВЕ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ В  
КОНТАКТНО-РЕКУПЕРАТИВНІЙ СИСТЕМІ З  
ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРНИМ ОХОЛОДЖЕННЯМ  
НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ГАЗІВ  
Одеська державна академія будівництва та архітектури

Запропонована нова система відбору та трансформації енергії відпрацьованих газів обертових печей для промислового теплопостачання. У результаті аналітичного дослідження встановлено модифікований критерій комплексної оцінки її енергетичної ефективності. Встановлено, що висока ефективність перетворення енергетичних потоків ( $\varphi = 10...15$ ) за початкової температури газів  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  може бути забезпечена при співвідношенні витрат теплоносія, що відбирається для технологічних потреб та комунально-побутового призначення у діапазоні  $0,3...0,7$ , а при температурі газів  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  обмежується діапазоном  $\Theta = 0,25...0,45$ .

**термотрансформація, утилізація, обертові печі**



VITALY PETRASH, YURI POLUNIN  
THE INFLUENCE OF THE RATIO OF THE COST OF WATER TECHNOLOGY  
AND HOUSEHOLD PURPOSE ON THE EFFECTIVENESS OF THERMO-  
TRANSFORMER COOLING OF LOW-TEMPERATURE GAS  
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

A new system for the selection and transformation of the energy of exhaust gases of rotary kilns for industrial heating is proposed. As a result of the analytical study, a modified criterion of comprehensive estimation of its energy efficiency, has been established. It is found that the high conversion efficiency of energy flows ( $\varphi = 10...15$ ) with an initial temperature gases of  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  can be provided at a ratio of expenses of selected heat transfer agent for technological needs and household purpose in the range of  $0,3...0,7$  and at a temperature gases  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  limited with range  $\Theta = 0,25...0,45$ .  
**thermotransformation, recycling, rotary kilns**

**Петраш Віталій Дем'янович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри опалення, вентиляції та охорони повітряного басейну Одеської державної академії будівництва та архітектури. Наукові інтереси: теплонасосні системи теплопостачання.

**Полунін Юрій Миколайович** – асистент кафедри опалення, вентиляції та охорони повітряного басейну Одеської державної академії будівництва та архітектури. Наукові інтереси: теплонасосні системи теплопостачання.

**Петраш Виталий Демьянович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой отопления, вентиляции и охраны воздушного бассейна Одесской государственной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: теплонасосные системы теплоснабжения.

**Полунин Юрий Николаевич** – ассистент кафедры отопления, вентиляции и охраны воздушного бассейна Одесской государственной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: теплонасосные системы теплоснабжения.

**Petrash Vitaly** – DSc (Eng.), Professor, Heating, Ventilation and the Air basin Protection Department, Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: heat pump heating systems.

**Polunin Yuri** – Assistant, Ventilation and the Air basin Protection Department, Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: heat pump heating systems.

УДК 504.455:579.22:658.567.5

**І. Ю. АРЕВАДЗЕ <sup>а</sup>, Н. Г. НАСОНКІНА <sup>б</sup>**

<sup>а</sup> Донецький національний університет, <sup>б</sup> Донбаська національна академія будівництва і архітектури

## **ДОСЛІДЖЕННЯ АНТИБАКТЕРІАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ВОД ДО СРІБЛОВМІСТКИХ ДЕЗІНФЕКТАНТІВ**

Розглянуто бактерицидну стійкість води, що оброблена іонами срібла різного генезису. Досліджено вплив матеріалів, що містять срібло на збереження бактерицидної стійкості води.

**природна вода, срібло, бактеріальна стійкість, електроліз, каталізатор, дезінфектанти, бактерії, мікроорганізми, катіон, аніон**

### **ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ**

Специфіка питного водопостачання в Україні полягає в тому, що воно на 75 % базується на поверхневих джерелах і залежить від їх екологічної безпеки [1]. Зростання ризику і зниження безпеки для систем водопостачання пояснюється, по-перше, значним зменшенням запасів води; а по-друге – різким погіршенням якості природних вод. Сучасний безповоротний водовідбір і скидання забруднених стічних вод по Україні істотно перевищують екологічну місткість водоресурсних систем. Всі водні джерела країни випробовують сильне антропогенне навантаження. У поверхневій водоймища України скидаються десятки тисяч тонн забруднюючих речовин. Тільки в Донецькому регіоні об'єми відкачки шахтних вод на земну поверхню складають понад 860 тис. м<sup>3</sup>/добу [2]. Ці води характеризуються переважно сульфатно-хлоридно-натрієвим складом та високою мінералізацією.

Зміна екологічної обстановки під впливом антропогенного навантаження призвела і до зміни мікробного фону навколишнього середовища. Вірусологічні і санітарно-вірусологічні дослідження, проведені на різних територіях, свідчать про забруднення природних вод, а також питної води в мережах вірусами різних груп. Це є однією з основних причин захворюваності населення гострими кишковими інфекціями [1]. Питома вага проб води, що незадовільняють за бактеріологічними показниками, збільшилася за останні роки по країні з 10,3 до 14,5 % [1]. Таке положення потребує нового підходу до забезпечення епідеміологічної безпеки, стимулює наукові дослідження по удосконаленню та впровадженню принципово нових засобів знезараження, що характеризуються не лише ефективністю, але й екологічністю. На це орієнтовано прийняття Закону України «Про питну воду і питне водопостачання», «Про забезпечення санітарного та епідеміологічного благополуччя населення» та впровадження в дію ДержСанПіНу 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» [3, 4].

Для знезараження стічних, зворотних та питних вод застосовують різні методи, основані на використанні хімічних препаратів, що містять сильні окислювачі (хлор, озон) та фізичні агенти (ультрафіолет). Найбільш перспективним сьогодні є напрям застосування різних комбінацій фізичних та хімічних факторів впливу на мікроорганізми. При цьому важливо знайти оптимальне співвідношення між ними, прийнятний рівень енергетичного впливу на воду для уникнення створення в ній умов для деструкції молекул домішок і самої води. Актуальним також є розширення номенклатури хімічних препаратів, які можуть, з одного боку, проявляти належні антибактеріальні властивості в умовах підвищених температур та при концентраціях нижче ГДК, а з іншого, легко адаптуватися до основних дезінфектантів (озону, УФ-променям, хлору), що сприяє екологічній безпеці [4, 5].

## АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ

Бактерицидна властивість іонів срібла звісна давно, навіть їх невелика концентрація викликає загибель присутніх в воді мікроорганізмів [5]. Встановлено, що найбільшу активність мають іони срібла, які свіжо виготовлені шляхом електролізу. Дезінфікуюча властивість цих іонів проявляється в широкому діапазоні значень рН, вона суттєво збільшується з ростом температури, що вигідно відрізняє їх від таких бактерицидних препаратів, як хлор, озон, діоксид хлору, гіпохлорит натрію.

## АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У СФЕРІ ЗНЕЗАРАЖЕННЯ ВОДИ

Роботи по вивченню процесів знезараження природних і стічних вод виконувалися під керівництвом таких вчених, як Л. О. Кульський, В. В. Гончарук, Н. О. Коваленко, А. Ю. Півників та інших [6–7, 13–14]. Проте сьогодні ще не повністю виявлено діапазон використання дезінфектантів, що містять срібло. Фахівці, що займаються підготовкою води з особливими вимогами до її бактеріологічної стабільності, сьогодні, як ніколи гостро потребують практичної літератури по знезараженню води.

## МЕТА ДОСЛІДЖЕНЬ

Поширення номенклатури срібловмістних дезінфектантів та меж їх ефективного застосування.

## МАТЕРІАЛ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розглянемо бактерицидну стійкість води, що оброблена іонами срібла різного генезису по відношенню до бактерій кишкової палички *E. coli*, яка була використана як індикатор забруднення. Згідно зі стандартними методиками число кишкових паличок у питній воді визначається позначенням – колі-індекс, який не повинен перевищувати 3 клітини на літр води (кл/л) [7, 8]. В іншому разі вода визначається непридатною для питного користування. Вміст організмів в поверхневих водних джерелах протягом року дуже змінюється: від десятків клітин до сотні тисяч. Залежно від величини *E. coli* природні води класифікують наступним чином: добра вода  $\leq 3$  кл/л; задовільна – від 4 до 10; слабо забруднена – від 11 до 102, забруднена – більш 104 кл/л.

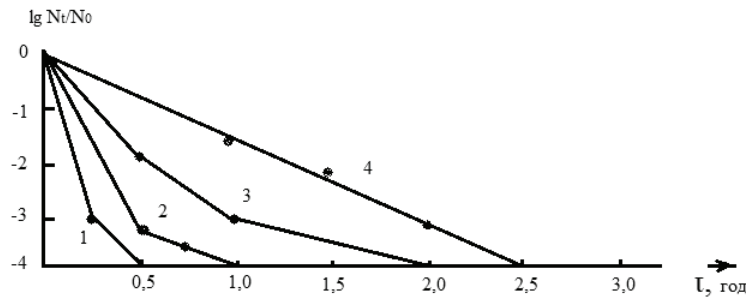
В експериментах використовували суспензію культури санітарно-зразкового мікроорганізму *E. coli*-1257 зі стандартною щільністю 108 кл/см<sup>3</sup>. Для приготування робочих розчинів з потрібною концентрацією мікроорганізмів суспензію розбавляли відповідним об'ємом дистильованої води, стерильної водопровідної, чи фізіологічним розчином (0,9 % NaCl у дистильованій воді). Попередньо встановлювали, що протягом усього часу експерименту бактеріальні клітини, які суспендовані в дистильованій воді, зберігали свою життєдіяльність, тому наступним кроком було введено бактерицидний препарат. Кількість мікроорганізмів, що вижили під впливом дезінфектанту, визначали оптичним методом по числу КСО (колонії створених одиниць) на середовищі Ендо через 24 години інкубації при 37 °С. Для підрахунку клітин застосовували метод мембранних фільтрів. Частину мікробіологічних досліджень виконували в лабораторіях ДержСанепідслужби України у м. Донецьку.

Долю клітин, що вижили, встановлювали згідно з відношенням  $N_t/N_0$ , де  $N_t$  – число бактерій, що вижили,  $N_0$  – вихідна кількість бактерій, що містилась в розчині,  $\tau$  – час спостережень (експозиції) або контакту клітин з дезінфектантом, хвил.

Досліди проводили у 3–6 кратній повторності. Отримані результати в подальшому опрацюванні математично з розрахунком критерію Стюдента.

Крім того, для співставлення різних за природою та генезисом дезінфектантів проводили розрахунок питомої швидкості відмирання мікроорганізмів, по відношенню до 1 мг активної речовини препарату, що застосовувався. Нами в дослідях використані розчини солей, в яких концентрація іонів  $Ag^+ \leq 0,05$  мг/л. На рис. 1 наведені результати досліджень впливу концентрації  $Ag^+$  на бактерицидну активність сульфату срібла. При цьому вхідне число мікроорганізмів складало 105 кл/л, температура знезараженої води –  $20,0 \pm 0,5$  °С. Отримані результати виявили залежність бактерицидної активності від концентрації іонів срібла. Так, знезараження 99,99 % (тобто на 4 порядку) досягається для концентрації 0,05 мг  $Ag^+$ /л через 30 хвил, а для концентрації 0,001 мг  $Ag^+$ /л аналогічний ефект фіксується лише через 150 хвил.

Характер процесу при електролітичному розчиненні срібла залежить не лише від умов, електролізу, але і від складу домішок води. Так, суспензії та розчинні солі впливають в тій мірі, в якій вони створюють на поверхні срібла щільні плівки, що роблять електроди малорозчинними, або змінюють хід електрохімічних реакцій на електродах. Присутність в воді хлоридів призводить до поступового створення на срібному аноді плівки хлориду срібла ( $Ag^+ + Cl^- \rightarrow AgCl$ ), яка перешкоджає подальшому розчиненню



**Рисунок 1** – Залежність бактерицидної активності  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$  від концентрації іонів срібла, мг/л: 1 –  $5 \cdot 10^{-2}$  (1 ГДК); 2 –  $2 \cdot 10^{-2}$  (0,4 ГДК), 3 –  $5 \cdot 10^{-3}$  ( $2 \cdot 10^{-1}$  ГДК), 4 –  $1 \cdot 10^{-3}$  ( $2 \cdot 10^{-2}$  ГДК).

металу та знижує вихід срібла по струму. Звісно, що великі кількості сульфатів заважають електролітичному розчиненню срібла з причини виділення на аноді кисню.

Вищезазначені міркування доводять про необхідність попереднього вивчення залежності виходу іонів срібла по струму від анодної щільності при різному вмісті срібла в аноді. Досліди проводили з природною водою р. Кальміус при температурі  $20^\circ\text{C}$ ; електродами (анодами) служили пластинки срібла пробою 999,9, 875 і 800, катодами – пластинки з титану. З аналізу отриманих даних (рисунок 2), з підвищенням щільності струму вихід срібла падає, це можна пояснити відповідним прискоренням побічних процесів на електроді. При цьому в зонах відносно малих щільностей (менш  $100 \text{ А/м}^2$ ) значення виходу срібла по струму співвідносяться для проб 999,9; 875 і 800 як 1 : 1,16 : 1,27, що дуже близько до співвідношення маси срібла в зазначених зразках.

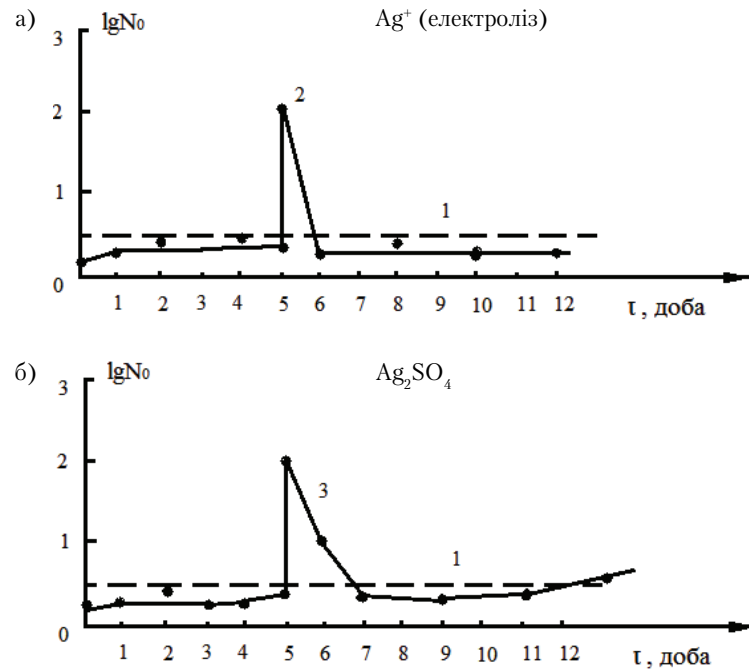


**Рисунок 2** – Залежність виходу іонів срібла по струму від анодної щільності струму при різному вмісті срібла в аноді: 1 – проба 999,9; 2 – проба 875; 3 – проба 800.

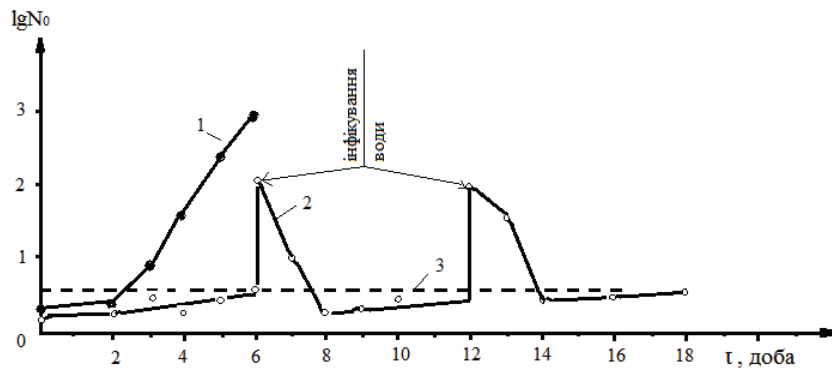
Розглянута бактерицидна стійкість води, що оброблена іонами срібла різного генезису до вторинного забруднення. Одержані результати досліджень стійкості води (з якої попередньо було відігнано залишковий хлор нагріванням до  $50^\circ\text{C}$  та наступною витримкою протягом 3 годин), яка була оброблена препаратами срібла (електролітичні іони та сульфат), до вторинного забруднення. Досліди проводили протягом 12 діб, температура в середньому складала  $20,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$ . У контрольній пробі (вода без введення дезінфектантів) вже на 3 добу зберігання коли-індекс перевищив безпечний рівень бактеріального забруднення (став вище 3). Проби води з препаратом срібла успішно чинили опір забрудненню, навіть коли вода була повторно штучно забруднена бактеріями *E. coli* в дозі 102 кл/л.

Наступні досліді проводили з різними пробами води: перша – вода водопровідна (хлорована, вміст залишкового хлору  $0,5 \text{ мг/л}$ ), друга – вода природна, що пройшла усі стадії пробопідготовки, але замість хлорування підлягала знезараженню за допомогою ДАА-катіонів при концентрації  $\text{Ag}^+$   $0,005 \text{ мг/л}$  і третя – аналогічно другому варіанту з концентрацією  $\text{Ag}^+$   $0,001 \text{ мг/л}$ . Аналізи вмісту мікроорганізмів проводили мікроскопічним методом через кожну добу. Результати експериментів представлено на рисунках 4 і 5.

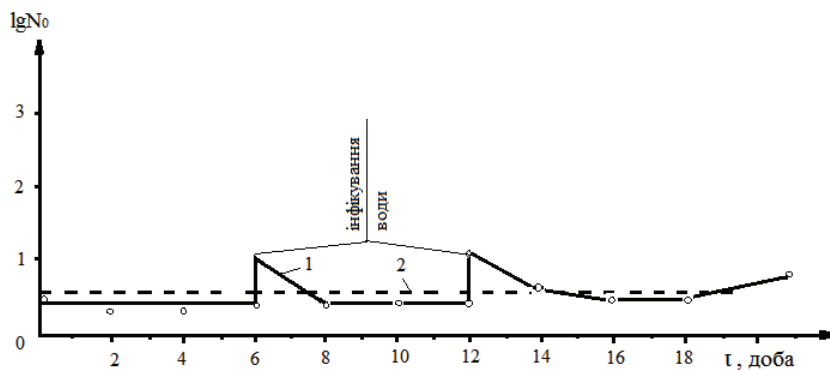
Отримані результати свідчать, що водопровідна хлорована вода має бактеріальну стійкість протягом 2 діб, після чого починається помітний ріст мікроорганізмів. Навпаки, вода, що містить ДАА-катіони, набуває здатність активно чинити опір вторинному бактеріальному забрудненню. Після штучного інфікування такої води вміст мікроорганізмів протягом 2 діб знову зменшується до безпечного рівня.



**Рисунок 3** – Бактерицидна стійкість води, що оброблена препаратами срібла (концентрація  $[Ag^+] = 5 \cdot 10^{-3}$  мг/л): 1 – бактеріально безпечна вода (колі-індекс 3), 2 – електролітично отриманими іонами, 3 – сульфатом срібла.



**Рисунок 4** – Бактеріальна стійкість різних проб води при 25 °С (1 серія): 1 – водопровідна (хлорована); 2 – вода, що містить ДАА-катіони ( $[Ag^+] = 0,005$  мг/л); 3 – бактеріально безпечна вода (колі-бактерій 3).



**Рисунок 5** – Бактеріальна стійкість різних проб води при 25 °С (2 серія): 1 – вода, що містить ДАА-катіони ( $[Ag^+] = 0,001$  мг/л); 2 – бактеріально безпечна вода.

Катіони срібла, створені в результаті електролізу, здатні контактувати не тільки з аніонами, але і з катіонами інших речовин. Останні можуть бути присутніми в воді як домішки, а також входити в

матеріали, з яких виготовлено трубопровід або ємність для зберігання води. Між вказаними катіонами та аніонами срібла можуть протікати електрохімічні реакції, що сприяють переведенню іонів  $\text{Ag}^+$  в інший, менш активний в бактерицидному відношенні стан.

Аналіз значень окислювально-відновлювальних потенціалів [8, 9] показує, що іони  $\text{Ag}^+$  (окислена форма) під впливом атомів більш активних металів (наприклад, алюмінію, цинку, заліза) будуть переходити у відновлену форму  $\text{Ag}^0$ , що має менш бактерицидну активність. З цієї причини ємності або трубопроводи з дюралюмінію, сталі, оцинкованого заліза не придатні для довготермінового збереження питної води. Логічно вишукати умови існування срібла в іонній формі та збереження бактерицидних властивостей протягом тривалого часу.

Розглянуто вплив матеріалу для збереження води на збереження бактерицидної активності електролітичних іонів срібла та ДАА-катіонів. Як матеріал застосували скло і сталь. Вхідна вода характеризувалась за наступними показниками. Загальне мікробне число (ЗМЧ) – 75, колі-бактерій – 50. Воду розливали у 2 ємності з різного матеріалу, вводили в них препарат, що досліджували: 1 – шляхом прямого електролізу розчинного аноду (срібло 999,9), 2 – шляхом введення свіжоприготовлених ДАА-катіонів. Концентрація срібла (в розрахунку на  $\text{Ag}^+$ ) в обох випадках склала  $5 \cdot 10^{-3}$  г/м<sup>3</sup>. Температура протягом всього часу експерименту підтримувалась на рівні  $19,0 \pm 0,1$  °С. Аналіз на вміст мікроорганізмів проводили через кожну добу. Результати досліджень представлено в табл. 1.

**Таблиця 1** – Бактеріальні показники води залежно від виду бактерицидного препарату та матеріалу ємності збереження

Препарат і матеріал ємності	Показник, який аналізують	Термін зберігання води, доба									
		1	2	3	4	5	10	15	20	25	30
$\text{Ag}^+$ (електроліз), скло	ЗМЧ	8	6	4	7	5	5	6	5	8	10
	колі-бактерії	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	3	4
$\text{Ag}^+$ (електроліз), скло	ЗМЧ	15	10	8	10	12	20	подальший ріст			
	колі-бактерії	<3	<3	<3	<3	3	10	подальший ріст			
$[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$ , скло	ЗМЧ	12	10	8	10	12	10	13	13	15	20
	колі-бактерії	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	3	3	3
$[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$ , сталь	ЗМЧ	35	25	10	14	15	12	20	18	20	32
	колі-бактерії	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	3	3	6

Аналіз табличних даних вказує, що питна вода, яка містить срібло, стійка до повторного бактеріального забруднення протягом тривалого часу. При цьому ДАА-катіони більш ефективні, ніж іони срібла, отримані електролізом.

Проведемо деякі підсумки досліджень бактериостатичних властивостей дезінфектантів молекулярної та іонної природи. Переважна частина від вхідних в воду іонів срібла зв'язується присутніми в воді хлорид-іонами і фактично не бере участі у здійсненні бактерицидного процесу. Однак при незначних концентраціях срібла забезпечує воді тривалу бактерицидну післядію.

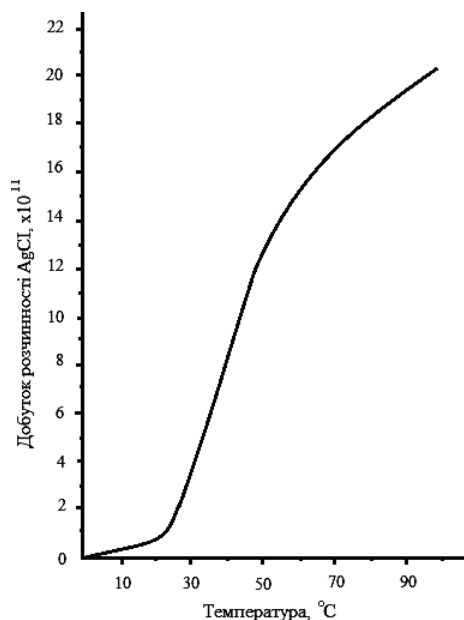
Розглянемо умови існування срібла в найбільш ефективній для бактерицидної дії формі. При вирішенні питання відносно оптимальної (з точки зору бактерицидної активності) концентрації срібла для знезараження води слід брати до уваги наступні міркування. При знезараженні води тим чи іншим хімічним дезінфектантам необхідно дотримуватись тих доз, які дають найбільший бактерицидний ефект, особливо це стосується такої кошовної речовини як срібло. Для вирішення питання про оптимальну концентрацію срібла в знезараженій воді необхідно передчасно врахувати наступне: 1) максимальний бактерицидний ефект на одиницю маси мають іони срібла, що свіжовиготовлені в результаті анодного розчинення металевих срібла. При концентрації  $10^{-5}$  мг/л вони впливають на загибель бактерій [5, 10]; 2) СанПиН 2.1.4.559-96 встановили для срібла ГДК 0,05 мг/л, що суттєво нижче для хлору, озону та деяких інших дезінфектантів. Тому при використанні більш високих концентрацій срібла з метою недопущення перебільшення ГДК, а також нераціональних витрат матеріалу слід в подальшому здобути з води надлишок кількості срібла; 3) іони срібла, коли досягають визначеної концентрації в воді, можуть зв'язуватись з деякими аніонами, що присутні у воді, створюючи погано розчинні ( $\text{AgCl}$ ,  $\text{Ag}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{AgBr}$ ,  $\text{Ag}_2\text{S}$ ) або малорозчинні ( $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ ) сполуки. Мірою розчинності вказаних солей, тобто вміст іонів срібла у вільному вигляді є добуток розчинності ДР (табл. 2). В природній воді Донецького регіону, що використовують як питну, з вказаних аніонів в помітних кількостях присутні лише  $\text{Cl}^-$  та  $\text{SO}_4^{2-}$ . Саме вони визначають стан, в якому може знаходитись срібло переважно у вигляді незв'язаних іонів або у вигляді співвідносних солей.

**Таблиця 2** – Значення добутку розчинності деяких солей срібла при 25 °С

Сполука	Хімічна рівновага в насиченому розчині	ДР
AgCl	$\text{AgCl} \leftrightarrow \text{Ag}^+ + \text{Cl}^-$	$1,78 \cdot 10^{-10}$
$\text{Ag}_2\text{SO}_4$	$\text{Ag}_2\text{SO}_4 \leftrightarrow 2\text{Ag}^+ + \text{SO}_4^{2-}$	$7,7 \cdot 10^{-5}$
$\text{Ag}_2\text{CO}_3$	$\text{Ag}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow 2\text{Ag}^+ + \text{CO}_3^{2-}$	$6,2 \cdot 10^{-12}$
AgBr	$\text{AgBr} \leftrightarrow \text{Ag}^+ + \text{Br}^-$	$5,3 \cdot 10^{-13}$
$\text{Ag}_2\text{S}$	$\text{Ag}_2\text{S} \leftrightarrow 2\text{Ag}^+ + \text{S}^{2-}$	$1,6 \cdot 10^{-19}$

У 1 л насиченого при 25 °С розчині AgCl одночасно знаходиться  $10^{-10} = 1,33 \cdot 10^{-5}$  моль-іон/л  $\text{Ag}^+$  та  $\text{Cl}^-$ , а в 1 л AgBr концентрації  $\text{Ag}^+$  та  $\text{Br}^-$  складають всього  $10^{-13} = 7,3 \cdot 10^{-6}$  моль-іон/л. З поняття ДР витікає умова створення і розчинення осаду AgCl: він створюється, коли добуток концентрацій іонів в розчині стає більше від величини ДР, тобто коли  $[\text{Ag}^+][\text{Cl}^-] > 1,78 \cdot 10^{-10}$ . І навпаки, розчинення осаду трапляється, коли добуток концентрацій його іонів в розчині стає менше від величини  $1,78 \cdot 10^{-10}$ .

Виходячи з температурної залежності ДР<sub>AgCl</sub> рис. 6, побудовано значення концентрації вільних іонів  $\text{Ag}^+$  у воді при різних температурах і вмісті іонів хлору (1 моль  $\text{Cl}^-$ /л = 35,5 мг/л). Співвідносні дані наведені в таблиці 3.


**Рисунок 6** – Температурна залежність добутку розчинності AgCl.

**Таблиця 3** – Залежність розрахункової концентрації іонів срібла  $\text{Ag}^+$  у воді від температури і вмісту іонів хлору

t, °C	ДР	Гранична концентрація іонів $\text{Ag}^+$ в воді залежно від температури і вмісту іонів хлору в воді ммоль/л							
		1	2	3	4	5	6	8	10
5	$2,5 \cdot 10^{-11}$	2,63	1,31	0,87	0,71	0,53	0,43	0,33	0,26
10	$3,8 \cdot 10^{-11}$	4,0	2,0	1,32	1,08	0,80	0,66	0,50	0,40
20	$1,6 \cdot 10^{-10}$	17,20	8,60	5,72	4,30	3,44	2,86	2,15	1,72
25	$1,7 \cdot 10^{-10}$	18,40	9,20	6,12	4,60	3,68	3,06	2,30	1,84
30	$2,5 \cdot 10^{-10}$	27,0	13,50	8,13	6,75	5,40	4,07	3,37	2,70
40	$8 \cdot 10^{-10}$	86,40	43,20	28,7	21,6	17,30	14,30	10,80	8,72
50	$1,3 \cdot 10^{-9}$	142,0	71,20	47,30	35,60	28,50	23,70	17,80	14,31
60	$1,55 \cdot 10^{-9}$	168,0	83,80	55,70	41,90	33,50	28,80	21,0	16,80
70	$1,75 \cdot 10^{-9}$	189,0	94,40	62,90	47,20	37,80	31,50	23,6	18,90

З аналізу табличних даних можна побачити, що трапляється збільшення концентрації іонів  $\text{Ag}^+$  в воді адекватно зростанню температури, причому особливо помітно починаючи з  $20^\circ\text{C}$  для усіх вивчених значень концентрації  $\text{Cl}^-$ . Знаючи вміст хлорид-іонів у знезараженій воді та температуру, можна, користуючись даними табл. 3, орієнтовно визначити долю найбільш бактерицидно активних іонів срібла в воді. Розрахунки можна застосувати і до природної води Донецького регіону, для якої концентрація  $\text{Cl}^-$  не перевищує  $5\text{ ммоль/л}$ , вміст  $\text{Ag}^+$  в інтервалі температур  $5\text{--}30^\circ\text{C}$  складе  $0,5\text{--}5,5 \cdot 10^{-3}\text{ мг/л}$ . Отже, знезараження води іонами срібла буде проходити найбільш ефективно при відносно високих температурах. Аналогічні розрахунки, проведені для установлення залежності іонів срібла (I) від концентрації сульфат-іонів, показали, що для природної води Донеччини (максимальна концентрація  $\text{SO}_4^{2-}$  не перевищує  $600\text{ мг/л}$ ) гранична концентрація іонів  $\text{Ag}^+$  у знезараженій воді при  $25^\circ\text{C}$  складає суттєво більшу величину (понад  $8\text{ мг/л}$ ). Таким чином, з двох головних аніонів води найбільш суттєвий вплив на зниження бактерицидної активності введеного срібла надає  $\text{Cl}^-$ .

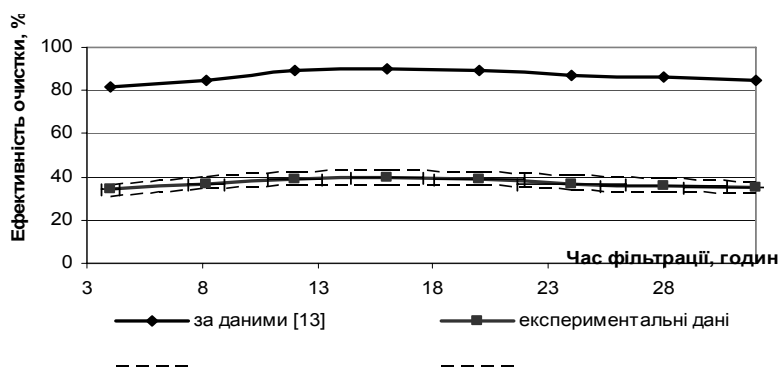
Відповідно з отриманими результатами досліджень, можна вважати доцільним застосування іонів срібла, особливо як індивідуального бактерицидного препарату (перед застосуванням потрібно зробити аналіз вмісту в знезараженій воді тих аніонів, які зв'язують іони срібла в малодисоціюючі сполуки, а значить і бактерицидно малоактивні). Наступним важливим фактором є температура. Ефективність «посріблення» води тим вище, чим менша концентрація в воді таких аніонів як  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  і навпаки, чим вище температура знезараженої води. Тому можна стверджувати про доцільність використання іонів срібла для тривалого зберігання запасів питної води в умовах теплої клімату.

Для цілей господарсько-питного водопостачання, як правило, доводиться обробляти велику кількість води, крім того, вартість її обробки повинна бути невеликою. У зв'язку з цим особливий інтерес представляють металокомплексні керамічні адсорбенти – каталізatori [13, 15, 16]. Механізм дії адсорбентів – каталізаторів заснований на синергетичному ефекті протікання двох взаємозв'язаних процесів: адсорбції і каталізу.

У досліджуваній зразок адсорбата – каталізатора фірми «Каталіз» включений широкий спектр сполук, з яких основними є оксиди  $\text{Cu(II)}$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{Fe(II, III)}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $(\text{Na, K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$ . Електронний обмін між іонами металів по механізму «перескоку» дозволяє молекулу кисню перетворити на активний іон – радикал, що і обумовлює підвищену активність шпінелів в окислювальних реакціях [13, 15, 16].

Ефективність технології адсорбційний – каталітичного знезараження обумовлена протіканням на поверхні каталізатора взаємозв'язаних адсорбційних і окислювально-відновних процесів при його одночасній бактерицидній дії.

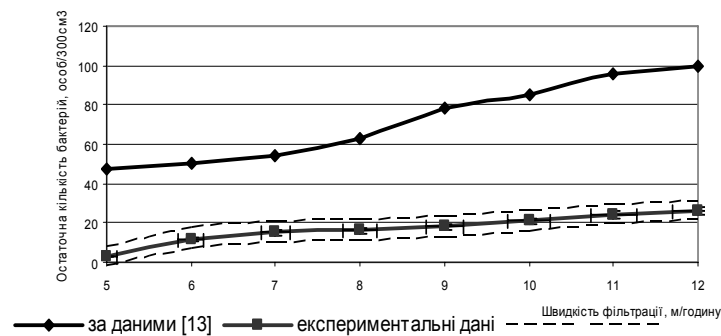
При дослідженні каталітичної активності адсорбенту – каталізатора одержані кінетики окислення і знезараження (рис. 7, 8).



**Рисунок 7** – Залежність ефективності очищення по перманганатній окислюваності від терміну перебування: (за експериментальними даними –  $\mathcal{E} = -0,17T^2 + 2,24T + 74,07$ ;  $R^2 = 0,94$ ,  $r = 0,98$ ,  $\delta = 0,6$ ); (за даними [13] –  $\mathcal{E} = -0,09T^2 + 1,83T + 27,79$ ;  $R^2 = 0,97$ ,  $r = 0,98$ ,  $\delta = 0,2$ ).

Як впливає з отриманих даних, каталізатор поводить по-різному для води із різним солевмістом. Хочеться відзначити, що на практиці часто зустрічаються випадки, коли води близькі по каламутності, кольоровості і іншим показникам, при очищенні поведуться по-різному, і водоочисні станції одного і того ж типу в одних умовах працюють цілком ефективно, а в інших не забезпечують потрібного ступеня очищення води. Тому необхідно даний каталізатор апробувати перед використанням.





**Рисунок 8** – Залежність знезаражувальної активності адсорбентів – каталізаторів (по коли-індексу) від швидкості фільтрації (за експериментальними даними –  $C = 2,87V - 7,5; R^2 = 0,93, r = 0,96, \delta = 0,06$ ); (за даними [13] –  $C = 8,44V - 0,12; R^2 = 0,97, r = 0,98, \delta = 0,3$ ).

## ВИСНОВКИ

Розглянуто бактерицидну стійкість води, що оброблена іонами срібла різного генезису. Досліджено вплив матеріалу для збереження води на стійкість бактерицидної активності електролітичних іонів срібла та ДАА-катіонів, які більш ефективні, ніж іони срібла, отримані електролізом.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Алипов, А. Н. Водообеспечение населения, промышленности и сельского хозяйства Донбасса. Вовлечение собственных ресурсов [Текст] / А. Н. Алипов, Д. Д. Мякий, Г. И. Янковская // Вода і водоочисні технології. – 2007. – № 4. – С. 17–22.
- Вода. Санітарні правила, норми і методи безпечного водокористування населення [Текст] : Збірник документів / Укладачі: Ю. А. Рохманин, З. И. Жолдакова, Г. Н. Красовский. – 2-і видання, перероблене і доповнене. – М. : Интерсєн, 2004. – 768 с.
- Мокієнко, О. В. Санітарно-епідеміологічна ситуація у водопостачанні [Текст] / О. В. Мокієнко // Вода і водоочисні технології. – 2001. – № 1. – С. 10–15.
- Скурлатов, Ю. И. Ультрафиолетовое излучение в процессах водоподготовки и водоочистки [Текст] / Ю. И. Скурлатов, Е. В. Штамм // Водоснабжение и санитар. Техника. – 1997. – № 9. – С. 14–18.
- Маслюк, А. І. Хлораторні установки водогінно-каналізаційного господарства [Текст] / А. І. Маслюк, О. І. Давиденко. – Київ : Будівельник, 1989. – 112 с.
- Кульський, Л. А. Серебряная вода [Текст] / Л. А. Кульський. – Киев : Наукова думка, 1987. – 109 с.
- Разработка эколого-гигиенической классификации качества поверхностных вод Украины – источников централизованного питьевого водоснабжения [Текст] / В. В. Гончарук, В. Н. Жукинський, А. П. Чернявская, В. Ф. Скубченко // Химия и технология воды. – 2003. – Т. 25, № 2. – С. 106–156.
- ДСанПіН 2.2.4-171-10. Державні санітарні норми та правила. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною [Текст] : затверджено Наказом Міністерства охорони здоров'я України № 400 від 12.05.2010 // Офіційний вісник України. – 2010. – № 51. – С. 99–129.
- Прикладная электрохимия [Текст] / под. ред. Н. Т. Кудрявцева. – 2-е пераб. доп. – М. : Химия, 1975. – 552 с.
- Плаксин, И. Н. Металлургия благородных металлов [Текст] / И. Н. Плаксин. – М. : Металлургиздат, 1958. – 366 с.
- Кульський, Л. А. Основы химии и технологии воды [Текст] / Л. А. Кульський. – Киев : Наукова думка, 1991. – 586 с.
- Возная, Н.Ф. Химия воды и микробиология [Текст] : [Учеб. пособие] / Н.Ф. Возная. – 2-е изд., М. : Высшая школа, 1999. – 340 с.
- Адсорбционно-каталитическая очистка и обеззараживание питьевой воды [Текст] / Н. А. Коваленко, А. Ю. Кочетков, Е. Л. Паршина [и др.] // Водное хозяйство России. – 2003. – Том 5, № 2. – С. 172–184.
- Водоснабжение [Текст] / А. Я. Найманов, С. Б. Никиша, Н. Г. Насонкина [и др.]. – Донецк : Издательство «Норт-Пресс», 2004. – 649 с.
- Пармон, В.Н. Отечественные катализаторы и новые ресурсосберегающие каталитические процессы в современной России. Катализ в промышленности [текст] / В. Н. Пармон, А.С. Носков. – Новосибирск : СО РАН, 2001. – № 1. – С. 6–17.

16. Ухина, А. В. Очистка природных вод от органических соединений [Текст] / А. В. Ухина // Новые исследования по сетям и сооружениям систем водоснабжения : межвузовский тематический сборник трудов / Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР, Ленинградский ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени инженерно-строительный институт ; ред. Н. Ф. Федоров.. – Л. : ЛИСИ, 1985. – С. 23–27.

Отримано 02.10.2014

И. Ю. АРЕВАДЗЕ <sup>a</sup>, Н. Г. НАСОНКИНА <sup>b</sup>

ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИБАКТЕРИАЛЬНОЙ СТОЙКОСТИ ВОД К  
СОДЕРЖАЩИМ СЕРЕБРО ДЕЗИНФЕКТАНТАМ

<sup>a</sup> Донецкой национальной университет, <sup>b</sup> Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

Рассмотрена бактерицидная стойкость воды, обработанной ионами серебра разного генезиса. Исследовано влияние материалов, которые содержат серебро на сохранение бактерицидной стойкости воды.

**природная вода, серебро, бактериальная стойкость, электролиз, катализатор, дезинфектанты, бактерии, микроорганизмы, катион, анион**

IRMA AREVADZE <sup>a</sup>, NADIY NASONKINA <sup>b</sup>

RESEARCH OF AGAINST BACTERIA FIRMNESS OF WATERS TO ARGENT  
PREPARATIONS FOR DISINFECTION

<sup>a</sup> Donetsk National University, <sup>b</sup> Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Bactericidal firmness of the water treated by the ions of silver of different genesis has been considered. Influencing of materials which contain silver on the maintenance of bactericidal firmness of water has been investigational.

**natural water, silver, bacterial firmness, electrolysis, catalyst, preparations for disinfection, bacteria, microorganisms, cation, anion**

**Аревадзе Ирма Юріївна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри фізики нерівноважних процесів, метрології та екології Донецького національного університету. Наукові інтереси: екологічна безпека.

**Насонкіна Надія Геннадіївна** – доктор технічних наук, професор кафедри міського будівництва і господарства Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: розвиток методики підвищення надійності систем водопостачання, розробка технологій очищення природних і стічних вод. Моніторинг систем водопостачання і каналізації.

**Аревадзе Ирма Юрьевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии Донецкого национального университета. Научные интересы: экологическая безопасность.

**Насонкина Надежда Геннадиевна** – доктор технических наук, профессор кафедры городского строительства и хозяйства Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: развитие методики повышения надежности систем водоснабжения, разработка технологий очистки природных и сточных вод. Мониторинг систем водоснабжения и водоотведения.

**Arevadze Irma** – PhD (Eng.), Associate Professor, No equilibrium Processes Physics, Metrology and Ecology Department, Donetsk National University. Scientific interests: environmental safety.

**Nasonkina Nadiy** – DSc (Eng.), Professor, Municipal Economy and Construction Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: development of method of increase of fail safety water-supply, development of technologies of natural and sewers waters treatment. Monitoring of the water and sewage systems.

## ЗМІСТ

САТІН І. В., ТРЯКІНА А. С. Дослідження гідрохімічного режиму каналу Сіверський Донець – Донбас	5
АНТОНЕНКО С. Є. Практична реалізація результатів роботи парових і жарогазотрубних теплогенераторів малої потужності з електрохімічною водопідготовкою	12
ОМЕЛЬЧЕНКО М. П., КОВАЛЕНКО Л. І. Контактні камери утворення пластівців з волокнистою насадкою	19
ГРИГОРЕНКО Н. І., МАЙСТРЕНКО О. В. Аналіз закордонного методу розрахунку систем вакуумної каналізації	24
ОРЛОВ С. М., ОРЛОВА А. Я. Дослідження доцільності застосування циклонів «правого» і «лівого» напрямку обертання в північній півкулі Землі	29
РОЖКОВ В. С., ЗАВОРОТНИЙ Д. В. Енергоефективні рішення в системах подачі та розподілу води	36
ДОЛГОВ М. В., ОЛЕКСЮК А. О., ЛЕВІН В. М., ШАЙХЕД О. В. Математична модель потокорозподілення в індивідуальному тепловому пункті з багатоконтурним теплообмінним апаратом (МТА)	40
ЗАЙЦЕВ О. М., ПЕТРЕКЕВИЧ Л. В., ТРИКОЛИЧ Т. Д. Вдосконалення низькотемпературних систем водяного опалення з комбінованими нагрівальними приладами	48
НАЗАРЕНКО О. М., ПОПЛАВСЬКА В. В. Теоретичні аспекти ринку водних ресурсів	53
ГОРОЖАНКІН С. А., ЧУХАРКІН А. В. Термодинамічні цикли комбінованих двигунів із зовнішнім підведенням теплоти	61
ОЛЕКСЮК А. О., ШИТІКОВА І. Г. Моделювання теплообміну в теплообміннику змієвикового типу для незалежних систем опалення та гарячого водопостачання	68
НЕЗДОЙМІНОВ В. І. Розрахункові залежності аеротенка із затопленою ерліфтною системою аерації	73
ПЕТРАШ В. Д., ПОЛУНІН Ю. М. Вплив співвідношення витрат споживної води на технологічне та комунально-побутове теплопостачання в контактено-рекуперативній системі з термотрансформаторним охолодженням низькотемпературних газів	78
АРЕВАДЗЕ І. Ю., НАСОНКІНА Н. Г. Дослідження антибактеріальної стійкості вод до срібло-вмістких дезінфектантів	86

## СОДЕРЖАНИЕ

САТИН И. В., ТРЯКИНА А. С. Исследование гидрохимического режима канала Северский Донец – Донбасс	5
АНТОНЕНКО С. Е. Практическая реализация результатов работы паровых и жарогазотрубных теплогенераторов малой мощности с электрохимической водоподготовкой	12
ОМЕЛЬЧЕНКО Н. П., КОВАЛЕНКО Л. И. Контактные камеры хлопьеобразования с волокнистой насадкой	19
ГРИГОРЕНКО Н. И., МАЙСТРЕНКО О. В. Анализ метода расчета систем вакуумной канализации, используемого в зарубежной практике	24
ОРЛОВ С. М., ОРЛОВА А. Я. Исследование целесообразности применения циклонов «правого» и «левого» направления вращения в северном полушарии Земли	29
РОЖКОВ В. С., ЗАВОРОТНЫЙ Д. В. Энергоэффективные решения в системах подачи и распределения воды	36
ДОЛГОВ Н. В., ОЛЕКСЮК А. А., ЛЕВИН В. М., ШАЙХЕД О. В. Математическая модель потокораспределения в индивидуальном тепловом пункте с многоконтурным теплообменным аппаратом (МТА)	40
ЗАЙЦЕВ О. Н., ПЕТРЕКЕВИЧ Л. В., ТРИКОЛИЧ Т. Д. Совершенствование низкотемпературных систем водяного отопления с комбинированными нагревательными приборами	48
НАЗАРЕНКО А. Н., ПОПЛАВСКАЯ В. В. Теоретические аспекты рынка водных ресурсов	53
ГОРОЖАНКИН С. А., ЧУХАРКИН А. В. Термодинамические циклы комбинированных двигателей с внешним подводом теплоты	61
ОЛЕКСЮК А. А., ШИТИКОВА И. Г. Моделирование теплообмена в теплообменнике змеевикового типа для независимых систем отопления и горячего водоснабжения	68
НЕЗДОЙМИНОВ В. И. Расчетные зависимости аэротенка с затопленной эрлифтной системой аэрации	73
ПЕТРАШ В. Д., ПОЛУНИН Ю. Н. Влияние соотношения расходов воды технологического и коммунально-бытового назначения на эффективность термотрансформаторного охлаждения низкотемпературных газов	78
АРЕВАДЗЕ И. Ю., НАСОНКИНА Н. Г. Исследование антибактериальной стойкости вод к содержащим серебро дезинфектантам	86

## CONTENTS

SATIN IGOR, TRIAKINA ALONA. The investigation of hydro chemical regime of channel Seversky Donets – Donbas	5
ANTONENKO SVETLANA. Practical realization of results of the work steam and fire-gas-tube heat generators of low power with electrochemical water treatment	12
OMEL'CHENKO MYKOLA, KOVALENKO LIUDMYLA. Contact flocculation chamber packed with fiber	19
GRIGORENKO NADEZHDA, MAJSTRENKO OLGA. Analysis of the calculation method of vacuum sewer systems used in foreign practice	24
ORLOV STANISLAV, ORLOVA ALLA. Study the feasibility of using cyclones «right» and «left» direction of rotation in the Northern hemisphere of the Earth	29
ROZHKOV VITALY, ZAVOROTNYIY DMITRIY. Energy-efficient solutions in the supply system and water distribution	36
DOLGOV NYKOLAY, OLEKSYUK ANATOLIY, LEVIN VIKTOR, SHAYHED OLGA. A mathematical model of the flow distribution in the individual heating units with multi-loop heat exchanger (AIT)	40
ZAITSEV OLEG, NAKONECHNY VASILY, PETREKEVICH LILY. Energy saving with low temperature heating systems	48
NAZARENKO OLEXIY, POPLAVSKAYA VALERIA. Theoretical aspects of the water resources market	53
GOROZHANKIN SERGEY, CHUKHARKIN ARTEM. Thermodynamic cycles of a combined engines with external heat supply	61
OLEKSIUK ANATOLIY, SHITIKOVA IRINA. Modelling of the heat exchange in the heat exchanger of a coiled type for the independent heating and hot water supply systems	68
NEZDOYMINOV VIKTOR. Calculated according to the aeration tank with air lift submerged aeration system	73
PETRASH VITALY, POLUNIN YURI. The influence of the ratio of the cost of water technology and household purpose on the effectiveness of thermo-transformer cooling of low-temperature gas	78
AREVADZE IRMA, NASONKINA NADIY. Research of against bacteria firmness of waters to argent preparations for disinfection	86