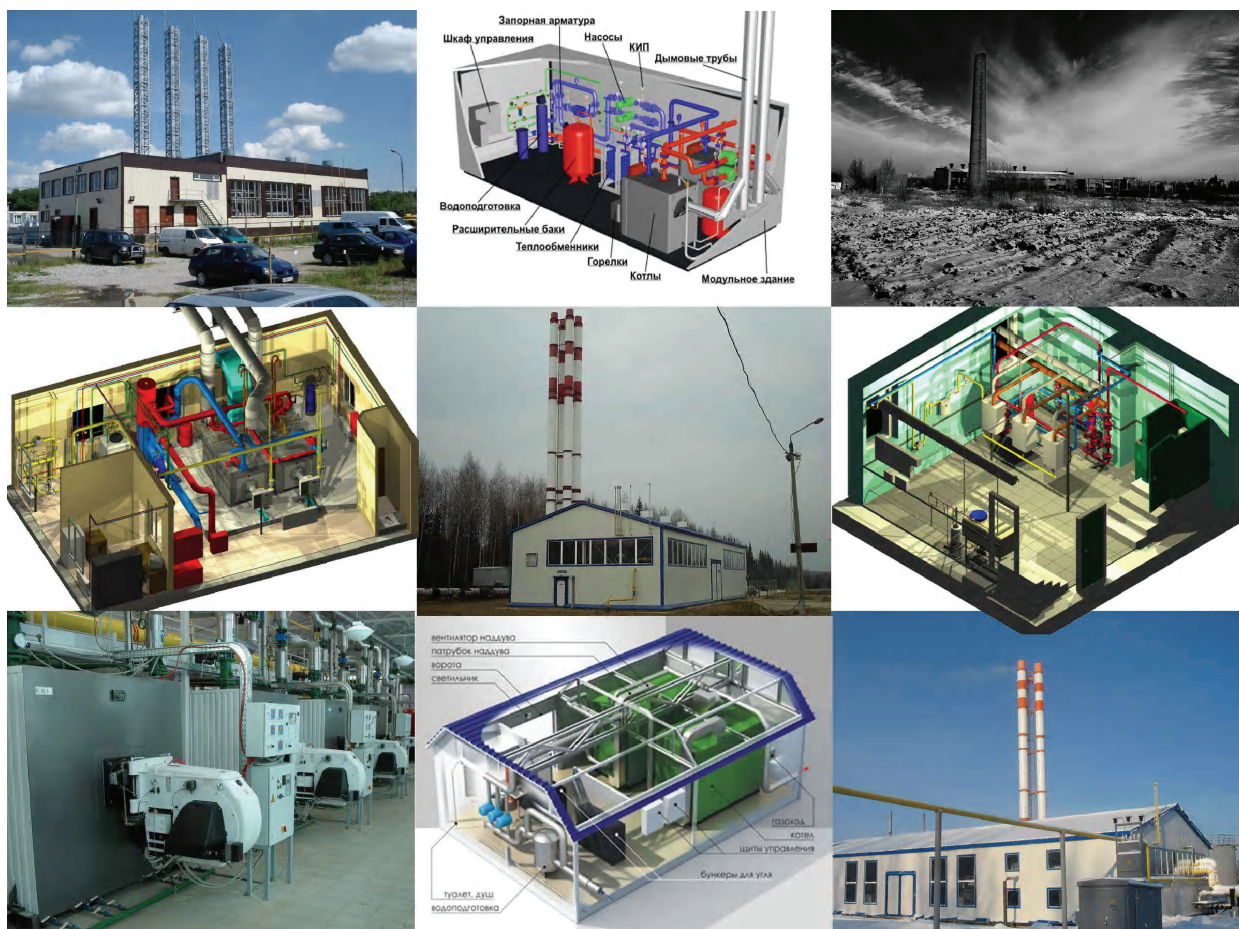


# ВІСНИК

ДОНБАСЬКОЇ НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ



**Випуск 2015-5(115)**

**ІНЖЕНЕРНІ СИСТЕМИ  
ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА**

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 2015-5(115)**

**ІНЖЕНЕРНІ СИСТЕМИ  
ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА**

Макіївка 2015

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 2015-5(115)**

**ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ  
И ТЕХНОГЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

Макеевка 2015

### **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 № 2 від 26.10.2015

### **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;  
Висоцький С. П., д. т. н., професор;  
Куліков М. І., д. т. н., професор;  
Олексюк А. О., д. т. н., професор;  
Андрійчук М. Д., д. т. н., професор;  
Нездоймінов В. І., д. т. н., професор.

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

Підписано до друку 16.11.2015 Формат 60х84 1/8. Папір багатофункціональний офісний.  
Друк різнографічний. Умов. друк. арк. 14,25 Тираж 300 прим. Заказ 149-15

### **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 № 2 від 26.10.2015

## **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;

Высоцкий С. П., д. т. н., профессор;

Куликов Н. И., д. т. н., профессор;

Олексюк А. А., д. т. н., профессор;

Андрийчук М. Д., д. т. н., профессор;

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

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

Программное обеспечение С. В. Гавенко

Компьютерная верстка Е. А. Солодкова

Подписано в печать 16.11.2015 Формат 60x84 1/8. Бумага многофункциональная офисная.

Печать ризографичная. Услов. печат. лист. 14,25 Тираж 300 экз. Заказ 149-15

## **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 628.16 + 697.4

**С. Е. АНТОНЕНКО**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## **ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИИ ПАРОВЫХ И ЖАРОГАЗОТРУБНЫХ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ВОДОПОДГОТОВКОЙ**

Выполнена технико-экономическая оценка эксплуатации паровых и жарогазотрубных теплогенераторов малой мощности с использованием электрохимического умягчения подпиточной воды по сравнению с традиционной водоподготовкой – двухступенчатым натрийкатионированием. Приведено сравнение вариантов, рассчитана сметная стоимость различных вариантов водоподготовки и экономическая эффективность использования электрохимического умягчения.

**электрохимическое умягчение, водоподготовка, экономический эффект**

### **ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Использование электрохимической водоподготовки рассматривалось в ряде научных работ [1–4]. Доказано, что применение электрохимического умягчения подпиточной воды для котлов малой мощности позволяет полностью отказаться от традиционного двухступенчатого натрийкатионирования. Сравнение вариантов подготовки подпиточной воды выполнено на примере прямоточного парового котла марки Пр-0,4-09, паропроизводительностью 0,400 т/ч, температура пара 145 °С, давление пара 0,9 МПа. Близким ему по характеристикам является паровой котел КВ-300, паропроизводительностью 0,45 т/ч, температура пара 120–130 °С, давление пара 0,07 МПа (0,7 кгс/см<sup>2</sup>). Котел КВ-300 предназначен для запарки кормов, отопления сельскохозяйственных зданий и нагрева воды. При эксплуатации же котла без водоподготовки толщина накипи 0,5 мм достигается за 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.

### **ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ УСТАНОВОК ВОДОПОДГОТОВКИ**

Высокая эффективность: гарантированное снижение накипеобразования на 95 % по сравнению с подпиткой котельной неумягченной водой.

Экономичность:

- котельная переводится на подпитку электрохимически умягченной водой,
- исключается химводоочистка подпиточной воды натрийкатионированием,
- исключается применение реагентов и сброс высокосольных стоков в окружающую среду,
- себестоимость обработки воды установкой электрохимического умягчения в 3 раза ниже обработки воды натрийкатионированием.

Энергозатраты:

- расход электроэнергии на обработку подпиточной воды не превышает в среднем 1,5 кВт·ч/м<sup>3</sup>.

Простота и безопасность эксплуатации:

- не требуется дополнительный обслуживающий персонал,
- установки сохраняют работоспособность и эффективность в широких диапазонах изменения параметров качества воды,

- напряжение на электродах установок не превышает 12 вольт,
- отсутствуют сбросы засоленных стоков.

### ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ

Технико-экономическое сравнение выполняем для трех вариантов:

Вариант 1 – подпитка котла водой, прошедшей водоподготовку двухступенчатым натрийкатионированием (наиболее распространенная на практике схема).

Вариант 2 – подпитка котла сырой неумягченной водопроводной водой и удаление накипи периодическими химическими промывками. Срок между химическими промывками котла – 30 суток.

Вариант 3 – подпитка котла электрохимически умягченной водой при удельном расходе электричества 150 А·ч/м³.

Для определения экономического эффекта необходимо по каждому варианту определить следующие затраты:

- 1) сметную стоимость на монтаж схемы водоподготовки (капитальные вложения);
- 2) годовые эксплуатационные затраты.

Расчет выполнен в соответствии со следующими документами:

- с прил. 7 [5];
- методические рекомендации по разработке бизнес-плана предприятия [6];
- методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов [7].

### СМЕТНАЯ СТОИМОСТЬ НА МОНТАЖ ВОДОПОДГОТОВКИ

Для определения капитальных вложений установок для умягчения воды использовались договорные цены, которые составили:

По варианту 1 – установка Na-катионитного умягчения воды – 22 тыс. грн.

Вариант 2 – не требует капитальных затрат.

Вариант 3 – установка электрохимического умягчения – 21,6 тыс. грн.

Расчет материалов для водоподготовительной установки Na-катионитного умягчения воды производительностью 0,4 м³/час, диаметром 480 мм, высота засыпки 0,9 м, обменная емкость катионита 700 г-экв/м³ (по данным предприятия «Макеевтеплосеть»).

1. Определяем количество регенераций в сутки:

$$n = \frac{24 \cdot J_0 \cdot Q_{Na}}{f_{Na} \cdot H_{cl} \cdot E_p}, \quad (1)$$

где  $n$  – число регенераций каждого фильтра в сутки,  
 $J_0$  – общая жесткость воды (10,0 мг-экв/дм³),  
 $H_{cl}$  – высота слоя материала в фильтре (м),  
 $f_{Na}$  – площадь фильтрования фильтра (м²),  
 $E$  – рабочая обменная емкость загрузочного материала,  
 $E_p^H$  по прил. 7 [5] (формула 7),

$$E_p^H = \alpha_{Na} \cdot \beta_{Na} \cdot E_{полн} - 0,5 q_{уд} J_{0исх}, \quad (2)$$

$\alpha_{Na}$  – коэффициент эффективности регенерации натрий-катионита, учитывающий неполноту регенерации катионита,  $\alpha_{Na} = 0,9$ ,

$\beta_{Na}$  – коэффициент, учитывающий снижение обменной емкости катионита по  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$  вследствие частичного задержания катионитов  $Na^{2+}$ , ( $\beta_{Na} = 0,5$ ),

$E_{полн}$  – полная обменная емкость катионита (г-экв/м³),  $E_{полн} = 1500$  г-экв/м³,

$q_{уд}$  – удельный расход воды на отмывку катионита, м³ на 1 м³ катионита,  $q_{уд} = 6$  м³/м³,

$J_{0исх}$  – общая жесткость исходной воды, для второй ступени  $J_{0исх} = 0,1$  г-экв/м³,

$$E_p^H = 0,9 \cdot 0,5 \cdot 1500 - 0,5 \cdot 6 \cdot 0,1 = 675 \text{ г-экв/м}^3,$$

$$n_1 = \frac{24 \cdot 10 \cdot 0,4}{0,18 \cdot 0,9 \cdot 700} = 0,85 \text{ рег/сут},$$

$$n_{II} = \frac{24 \cdot 0,1 \cdot 0,4}{0,18 \cdot 0,9 \cdot 675} = 0,009 \text{ рег/сут}.$$

2. Регенерация фильтрующего материала производится технической поваренной солью. Расход 100%-ной соли на регенерацию Na-катионитного фильтра:

$$Q_c = E_p \cdot f_{Na} \cdot H_{cl} \cdot D_c \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

где  $Q_c$  – расход поваренной соли на одну регенерацию (кг),  
 $D_c$  – удельный расход соли на регенерацию (г/г-экв), ( $D_c^I = 120$  г/г-экв;  $D_c^{II} = 300$  г/г-экв),

$$Q_c^I = 700 \cdot 0,18 \cdot 0,9 \cdot 120 \cdot 10^{-3} = 13,6 \text{ кг/рег.}$$

$$Q_c^{II} = 675 \cdot 0,18 \cdot 0,9 \cdot 300 \cdot 10^{-3} = 32,8 \text{ кг / рег.}$$

Расход технической соли в сутки определяется по формуле:

$$Q_{mc} = \frac{Q_c \cdot n \cdot 100}{p}, \quad (4)$$

где  $Q_{mc}$  – расход технической соли в сутки (кг/сут),  
 $p$  – содержание NaCl в технической соли (%),

$$Q_{mc}^I = \frac{13,6 \cdot 0,85 \cdot 100}{93} = 12,4 \text{ кг / сут,}$$

$$Q_{mc}^{II} = \frac{32,8 \cdot 0,009 \cdot 100}{93} = 0,317 \text{ кг / сут.}$$

Общий расход соли  $12,4 + 0,317 = 12,717$  кг / сут = 4,6 т / год.

3. Общий расход воды на регенерацию Na-катионитного фильтра складывается из расходов воды на взрыхляющую промывку, приготовление регенерационного раствора, отмывку от продуктов регенерации и избытка поваренной соли.

Расход воды на взрыхление ( $m^3$ )

$$Q_{взр} = i \cdot f_{Na} \cdot 60 \cdot t_{взр} \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

где  $i$  – интенсивность взрыхляющей промывки фильтров, л/(см<sup>2</sup>),  
 $t_{взр}$  – продолжительность промывки (мин.),

$$Q_{взр}^I = 4 \cdot 0,18 \cdot 60 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 1,3 \text{ м}^3,$$

$$Q_{взр}^{II} = 4 \cdot 0,18 \cdot 60 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 1,3 \text{ м}^3.$$

Расход воды на приготовление регенерационного раствора соли определяется по формуле:

$$Q_p = \frac{Q_{Na} \cdot 100}{1000 \cdot B \cdot P_p}, \quad (6)$$

где  $B$  – концентрация регенерационного раствора, % ( $B^I = 5-8\%$ ;  $B^{II} = 8-12\%$ ),  
 $P_p$  – плотность регенерационного раствора (т/м<sup>3</sup>),

$$Q_p^I = \frac{13,6 \cdot 100}{1000 \cdot 5 \cdot 1,071} = 0,25 \text{ м}^3,$$

$$Q_p^{II} = \frac{32,8 \cdot 100}{1000 \cdot 10 \cdot 1,071} = 0,31 \text{ м}^3.$$

Расход воды на отмывку фильтрующего материала от продуктов регенерации ( $m^3$ ):

$$Q_{отм} = q_{отм} \cdot f_{Na} \cdot H_{cl}, \quad (7)$$

где  $q_{отм}$  – уд. расход воды на отмывку катионита (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>),

$$Q_{отм}^I = 6 \cdot 0,18 \cdot 0,9 = 0,97 \text{ м}^3,$$

$$Q_{отм}^{II} = 6 \cdot 0,18 \cdot 0,9 = 0,97 \text{ м}^3.$$

Расход воды на собственные нужды на одну регенерацию ( $m^3$ ):

$$Q_{сн} = Q_p + Q_{взр} + Q_{отм}, \quad (8)$$

$$Q_{сн}^I = 0,25 + 1,3 + 0,97 = 2,52 \text{ м}^3,$$

$$Q_{сн}^{II} = 0,31 + 1,3 + 0,97 = 2,58 \text{ м}^3.$$

Среднесуточный расход на собственные нужды составит  $Q_{сн} \cdot n$

$$Q_{сн}^I = 2,52 \cdot 0,85 = 2,14 \text{ м}^3 / \text{сут},$$

$$Q_{сн}^{II} = 2,58 \cdot 0,009 = 0,023 \text{ м}^3 / \text{сут}.$$

Общий расход воды составит  $2,163 \text{ м}^3 / \text{сут}$  и  $790 \text{ м}^3 / \text{год}$ .

Результаты расчетов сводим в таблицу 1 (данные приняты на 2014 г.).

**Таблица 1** – Затраты на строительство, расходы материалов и энергии

№ п/п	Показатели	Вариант 1 (базовый с ХВО)	Вариант 2 (без водо- подготовки)	Вариант 3 (электрохимическое умягчение)
1	Паропроизводительность котельной, т/ч	0,400	0,400	0,400
2	Капитальные затраты, тыс. грн.	22	–	21,6
3	Стоимость одной промывки, тыс. грн.	–	6,1	–
4	Расход электроэнергии, тыс. кВт-ч/год <sup>1</sup>	1,0	–	3,7
5	Расход соли на регенерацию т/год	4,6	–	–
6	Расход катионита, т/год	0,03	–	–
7	Годовые затраты воды на регенерацию, м <sup>3</sup> /год	790	–	–
8	Цена 1 кВт-ч электроэнергии, грн. <sup>2</sup>	1,18	1,18	1,18
9	Стоимость воды, грн. / м <sup>3</sup> <sup>3</sup>	5,94	–	–
10	Стоимость соли, грн. / т	0,32		
11	Стоимость катионита, тыс. грн. / т	15		
12	Продолжительность непрерывной работы в год, час	8 760	8 760	8 760

При расчетах затрат использованы следующие источники:

<sup>1</sup> Расход электроэнергии для установок На-катионирования принят по данным предприятия Макеевтеплосеть.

Расход электроэнергии для установки электрохимводоочистки рассчитывался следующим образом:

$$P_{э} = D_{э} \cdot U \cdot Q \cdot n \cdot 10^{-3}, \text{ кВт-ч / год}, \quad (9)$$

где  $D_{э}$  – доза электричества 150 А-ч / м<sup>3</sup>,  
 $U$  – напряжение установки (7 В),  
 $Q$  – производительность установки (м<sup>3</sup> / час),  
 $n$  – количество часов работы,

$$P_{э} = 150 \cdot 7 \cdot 0,4 \cdot 8 760 \cdot 10^{-3} = 3 679 \text{ кВт-ч / год},$$

<sup>2</sup> Стоимость электроэнергии взята по тарифам Донбассэнерго.

<sup>3</sup> Стоимость воды взята по тарифам КП «Вода Донбасса» по данным Макеевтеплосеть.

## ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Годовые эксплуатационные затраты определяются по формуле:

$$Z_{год} = Z_{э} + A_o + Z_{тр} + C_{пр} + W + K + C, \quad (10)$$

где  $Z_{э}$  – годовые затраты на электроэнергию, тыс. грн.;  
 $A_o$  – годовые амортизационные отчисления, тыс. грн.;  
 $Z_{тр}$  – годовые затраты на текущий ремонт, тыс. грн.;  
 $W$  – стоимость воды, использованной на регенерацию фильтров, тыс. грн.;  
 $K$  – стоимость катионита, тыс. грн.;  
 $C$  – стоимость соли, тыс. грн.

Годовые затраты на электроэнергию, определяли по формуле:

$$З_э = P_э \cdot Ц_э, \quad (11)$$

где  $P_э$  – годовой расход электроэнергии, кВт·ч/год;  
 $Ц_э$  – стоимость 1 кВт·ч, грн.

Годовые амортизационные отчисления определяли по формуле:

$$A_o = \frac{(C_H - C_L)}{T}, \quad (12)$$

где  $C_H$  – стоимость оборудования начальная, тыс. грн.;  
 $C_L$  – стоимость оборудования ликвидационная, тыс. грн.;  
 $T$  – срок эксплуатации оборудования (год).

$$\begin{aligned} A_{o1} &= \frac{22,000 - 2,200}{10} = 1,980 \text{ тыс. грн.} \\ A_{o2} &= \frac{0,000 - 0,000}{10} = 0,000 \text{ тыс. грн.} \\ A_{o3} &= \frac{21,600 - 2,200}{10} = 1,940 \text{ тыс. грн.} \end{aligned}$$

Годовые затраты на текущий ремонт, определяли по формуле:

$$З_{тр} = A_o \cdot 0,2. \quad (13)$$

$$\begin{aligned} З_{тр1} &= 1,980 \cdot 0,2 = 0,396 \text{ тыс. грн.} \\ З_{тр2} &= 0,000 \cdot 0,2 = 0,000 \text{ тыс. грн.} \\ З_{тр3} &= 1,940 \cdot 0,2 = 0,388 \text{ тыс. грн.} \end{aligned}$$

Годовые эксплуатационные затраты сводим в таблицу 2.

**Таблица 2** – Годовые эксплуатационные затраты по вариантам

№ п/п	Показатели	Вариант 1 (базовый с ХВО)	Вариант 2 (без водо- подготовки)	Вариант 3 (электро- химическое умягчение)
1	Капитальные затраты, тыс. грн.	22	–	21,6
2	Стоимость промывки, тыс. грн. в год	–	73,2	–
3	Стоимость электроэнергии, тыс. грн.	1,18	–	4,366
4	Годовые затраты на приобретение соли, тыс. грн.	1,472	–	–
5	Годовые затраты на приобретение катионита, тыс. грн.	0,45	–	–
6	Стоимость воды на регенерацию, тыс. грн.	4,69	–	–
7	Затраты на текущий ремонт, тыс. грн.	0,396	–	0,388
	Годовые эксплуатационные затраты, тыс. грн.	30,188	73,2	26,354

Приведенные затраты по вариантам определяются по формуле:

$$З_i = З_{год_i} + E \cdot K_i, \quad (14)$$

где  $З_i$  – приведенные затраты по сравниваемым вариантам,  
 $З_{год_i}$  – годовые эксплуатационные затраты,  
 $E$  – коэффициент экономической эффективности ( $E = 1/T$ ),  
 $K_i$  – капитальные вложения  $i$ -го варианта.

$$З_1 = 30,188 + 22,000 \cdot 0,10 = 32,388 \text{ тыс. грн.}$$

$$З_2 = 73,200 + 0,000 \cdot 0,10 = 73,200 \text{ тыс. грн.}$$

$$З_3 = 26,354 + 21,600 \cdot 0,10 = 28,514 \text{ тыс. грн.}$$

Экономический эффект определяли по формуле:

$$\mathcal{E} = \mathcal{Z}_1 - \mathcal{Z}_2, \quad (15)$$

где  $\mathcal{E}$  – экономический эффект от применения оптимального варианта;  
 $\mathcal{Z}_1, \mathcal{Z}_2$  – приведенные затраты по 1-му и 2-му вариантам.

Экономический эффект составляет:

$$\mathcal{E}_{1-3} = 32,388 - 28,514 = 3,874 \text{ тыс. грн.},$$

$$\mathcal{E}_{2-3} = 73,200 - 28,514 = 44,686 \text{ тыс. грн.}$$

## ВЫВОДЫ

Экономически выгодным является вариант 3 – электрохимическое умягчение подпиточной воды. Экономический эффект от одной установки по сравнению с традиционным На-катионированием составляет 3,874 тыс. грн. на один котел производительностью 0,4 т/ч. При использовании электрохимического умягчения для прямоточного парового котла, работающего без водоподготовки, экономический эффект составит 44,686 тыс. грн.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Найманов, А. Я. Электрохимическая технология водоподготовки для паровых котлов [Текст] / А. Я. Найманов, Н. И. Зотов, С. Е. Антоненко // Коммунальное хозяйство городов, серия «Технические науки и архитектура». – Киев : Техніка, 2004. – Вып. 58 – С. 89–94.
2. Антоненко, С. Е. Теоретические предпосылки эффективности электрохимической водоподготовки [Текст] / С. Е. Антоненко // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2013. – Вип. 2013-5 (103) : Інженерні системи та техногенна безпека. – С. 89–93.
3. 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, No6. – P. 117–124.
4. Антоненко, С. Е. Практическая реализация результатов работы паровых и жарогазотрубных теплогенераторов малой мощности с электрохимической водоподготовкой. [Текст] / С. Е. Антоненко // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2014. – Вип. 2014-5(109) : Інженерні системи та техногенна безпека. – С. 12–18.
5. СНиП 2.04.02-84\*. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения [Текст]. – Взамен СНиП II-31-74 ; введ. 1985-01-01. – М. : Стройиздат, 1985. – 136 с.
6. Методичні рекомендації з розроблення бізнес-плану підприємств [Електронний ресурс] : наказ Міністерства економіки України № 290 від 06.09.2006. – К. : М-во економіки України, 2006. – 123 с. – (Нормативний документ Міністерства економіки України). – Режим доступу : <http://zakon.nau.ua>. – Загол. з екрану.
7. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов [Текст] : (вторая редакция) / М-во экон. РФ, Мин-во фин. РФ, ГК по стр-ву, архит. и жил. политике ; [рук. авт. кол.: В. В. Косов, В. Н. Лившиц, А. Г. Шахназаров]. – М. : ОАО «НПО» Изд-во «Экономика», 2000. – 421 с.

Получено 01.09.2015

С. Е. АНТОНЕНКО

### ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПАРОВИХ І ЖАРОГАЗОТРУБНИХ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРІВ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ З ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЮ ВОДОПІДГОТОВКОЮ Донбаська національна академія будівництва і архітектури

Виконано техніко-економічну оцінку експлуатації парових і жарогазотрубних теплогенераторів малої потужності з використанням електрохімічного зм'якшення підживлювальної води в порівнянні із традиційною водопідготовкою – двоступеневим натрійкатіонуванням. Наведено порівняння варіантів, розрахована кошторисна вартість різних варіантів водопідготовки та економічна ефективність використання електрохімічного зм'якшення.

**електрохімічне зм'якшення, водопідготовка, економічний ефект**

SVETLANA ANTONENKO

TECHNICAL AND ECONOMIC ASSESSMENT OF OPERATION OF STEAM  
BOILERS AND FIRE-TUBE HEAT GENERATORS OF LOW POWER WITH  
ELECTROCHEMICAL WATER TREATMENT

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

The technical and economic assessment of steam boilers operation and fire-tube heat generators of low power operation was accomplished regarding to the use of electrochemical softening of makeup water it was compared to the traditional water treatment – a two-level Na-cation water softening. The comparison of variants is given, the estimated cost of different variants of water treatment as well as the economic efficiency of the electrochemical softening usage were calculated.

**electrochemical softening, water treatment, economic effect**

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

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

**Antonenko Svetlana** – Ph.D. (Eng), Associate Professor, 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 695.97

**Н. А. МАКСИМОВА, О. В. ШАЙХЕД**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## **СИСТЕМА КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ЖИЛОГО ДОМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АРТЕЗИАНСКОЙ ВОДЫ**

Разработан метод использования холода артезианской воды для системы кондиционирования воздуха жилого дома. Проанализированы возможности и преимущества этих систем, дана оценка эффективности предложенной системы.

**энергосбережение, охлаждение, артезианская вода, хладагент, кондиционирование**

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Проблемы экономии энергоресурсов являются актуальными и важными в настоящее время. Стоимость топлива, тепловой энергии и электроэнергии растет, и эта тенденция прогнозируется на будущее. В связи с этим очевидна важность выявления мер по снижению энергозатрат при работе системы кондиционирования.

Сооружение и эксплуатация систем кондиционирования воздуха связаны с большими затратами средств. Это обуславливает необходимость реализации таких путей совершенствования систем и экономии средств, которые были бы направлены, прежде всего, на эффективное использование и экономию энергии, на использование нетрадиционных ее источников.

Одним из возможных путей сокращения потребляемой мощности и повышением эффективности системы кондиционирования воздуха является использование нетрадиционных источников энергии, в частности артезианской воды.

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

Для охлаждения и осушения воздуха в системах кондиционирования воздуха (СКВ) могут быть использованы естественные источники холода (лед, артезианская или грунтовая вода), холодильные машины, а также комбинации естественных источников холода с холодильными машинами. Возможность использования артезианских и грунтовых вод в качестве источника холода для СКВ определяется водоносностью почвенных горизонтов, температурой воды, ее химическим и бактериальным составом, жесткостью. Из перечисленных свойств температура является основным фактором применимости в СКВ. Артезианская вода должна быть тем холоднее, чем более низкая температура воздуха должна поддерживаться в помещении и чем большей является нагрузка на СКВ по скрытой теплоте [2].

При использовании в качестве источника холода артезианской воды целесообразнее применять двухступенчатое орошение воздуха. Такая схема имеет экономические преимущества вследствие более эффективного использования запаса холода воды (при этой схеме обработки воды можно достичь большего температурного перепада охлаждающей воды).

Разработкой энергоэффективного метода кондиционирования и эффективного комплексного метода расчета систем кондиционирования воздуха с использованием артезианской воды занимались многие ученые [1, 3]. Эти исследования имеют существенное значение для создания эффективных систем кондиционирования воздуха в условиях современных требований по энергосбережению.

## ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данного исследования является разработка системы кондиционирования жилого дома с использованием артезианской воды и предложений по вторичному использованию воды в системе холодоснабжения жилого дома.

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

В наше время основным источником холода для кондиционирования воздуха в жилых помещениях небольших жилых домов применяются парокомпрессионные холодильные машины. Хладагентом в этих машинах служат химические соединения на основе хлорфторуглеродов, гидрохлорфторуглеродов, фторуглеродов и дифторуглеродов под общим названием фреоны. Причем первые два вида этих химических соединений является экологически опасными, так как разрушают озоновый слой земли. Парокомпрессионные холодильные машины достаточно сложны в производстве, используют в процессе своей работы большое количество электроэнергии и требуют регулярного технического обслуживания. В связи с выше перечисленным актуальность применения артезианской воды в качестве хладоносителя в современных системах кондиционирования воздуха для частных домов довольно высокая.

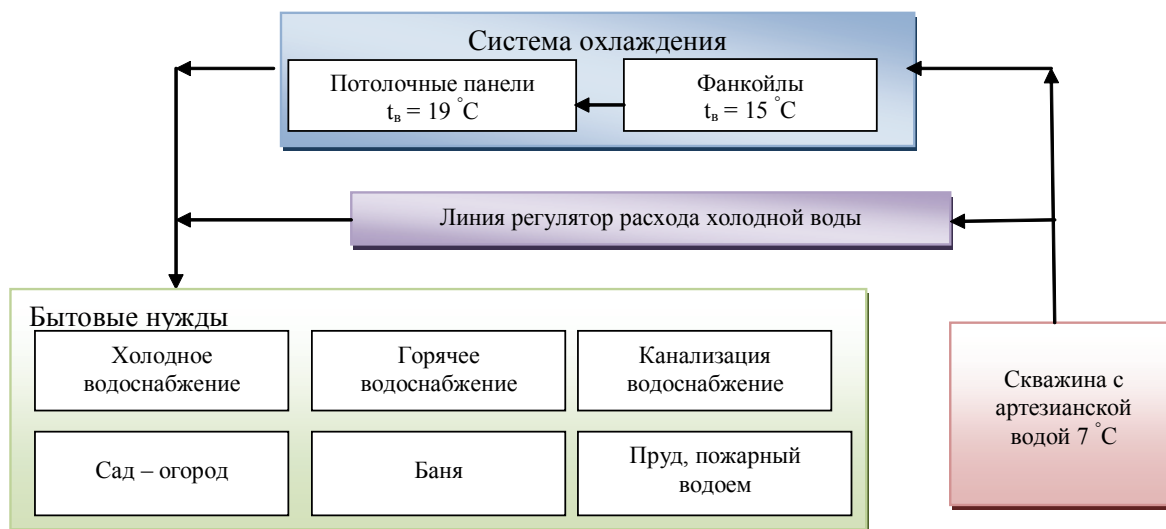
Как известно, в парокомпрессионных холодильных машинах в качестве рабочего вещества используются различные фреоны. Альтернативой является применение артезианской воды в качестве источника холода. Артезианская вода – бесплатный источник холода и никак не влияет на окружающую среду. Также парокомпрессионные машины требуют тщательного ухода и ремонта, а фанкойлы менее требовательная техника, простая в эксплуатации.

При рассмотрении объектов, находящихся в отдаленных от городской застройки районах, забор холодной воды на нужды водоснабжения целесообразно осуществлять из артезианской скважины. Вода имеет температуру в летний период  $5-7^{\circ}\text{C}$ .

В стандартных системах кондиционирования для приготовления воды с такой температурой используются фреоновые холодильные машины – чиллеры или градирни. Именно это оборудование является наиболее дорогим и сложным в эксплуатации в системах кондиционирования, кроме того, компрессор холодильной машины потребляет много электроэнергии, а использование фреона может нанести вред окружающей среде. Поэтому предлагается использовать воду, добытую из водозаборной артезианской скважины.

Вода, выкаченная из артезианской скважины, с  $T = 7^{\circ}\text{C}$  поступает в первый контур, на фанкойлах она нагревается до  $T = 15^{\circ}\text{C}$  и направляется во второй контур, где, проходя через охлаждающие панели, нагревается еще до  $T = 19^{\circ}\text{C}$  и после этого, проходя через очиститель, отправляется на хозяйственные нужды.

Предлагаемая система будет состоять из насоса, первого контура (фанкойлы), второго контура (потолочные охлаждающие панели), после чего проходя через очиститель распределяться на хозяйственные нужды (рис.).



**Рисунок** – Схема системы кондиционирования воздуха с применением холодной воды из артезианской скважины.

*Первый контур предложенной системы кондиционирования воздуха*

Подача воды из артезианской скважины в контур системы холодоснабжения осуществляется с помощью устройства для забора воды, из которого система кондиционирования воздуха заполняется водой через трехходовой клапан. Контур системы кондиционирования состоит из трубчатого теплообменника, который размещают непосредственно в скважине, насоса, который перекачивает хладагент по подающему трубопроводу на водяной теплообменник – фанкойл. После фанкойла вода, по обратному трубопроводу, возвращается в трубчатый теплообменник для охлаждения воды, нагретой фанкойлами.

*Второй контур системы кондиционирования*

Второй контур, в который вода попадает после фанкойлов, будет вмонтирован в потолок. Такая схема придаст помещению большую возможность для охлаждения помещения в короткие сроки. Главной проблемой является температура воды, которая будет поступать на второй контур. Ведь, как известно, панели работают по принципу испарения и если температура воды будет меньше точки росы, то вся вода будет выделяться на потолок. Для предотвращения образования конденсата на охлаждающих панелях необходимо, чтобы температура поступающей в них воды была выше температуры точки росы воздуха помещения.

Предложенная система кондиционирования была рассчитана для загородного дома площадью  $S = 240,6 \text{ м}^2$ . Подобрано все основное оборудование, выполнен гидравлический расчет системы.

Холодопроизводительность системы кондиционирования:  $Q_x = 24,638 \text{ кВт}$ .

Расход электроэнергии на перекачку воды насосом из артезианской скважины составляет:

$$N_{\text{потр.}} = 0,976 \text{ кВт}.$$

Исходя из этих данных коэффициент преобразования энергии (холодильный коэффициент) в предложенной установке с использованием естественного охлаждения определяется по формуле:

$$e = \frac{Q_x}{N_{\text{потр.}}}, \quad (1)$$

$$e = \frac{24,638}{0,976} = 25,24.$$

В стандартной системе кондиционирования, предлагаемой для данного типа воздухоохладителей, затраты электроэнергии на работу холодильной машины (чиллера модели YLCD 40T-TP фирмы York) для получения указанного количества холода составляют:

$$N_{\text{потр.}} = 15,5 \text{ кВт}.$$

В этом случае холодильный коэффициент равен:  $e = 24,638 / 15,5 = 1,59$

Сравнение показывает, что такая система имеет гораздо большую энергетическую эффективность (коэффициент преобразования энергии в 15,9 раза выше, чем у стандартных машин), экономит около 90 % электроэнергии и не наносит вреда окружающей среде, так как работает без фреоновой холодильной машины.

Кроме того, вода на выходе из водяного теплообменника имеет температуру  $+7^\circ\text{C}$  и может использоваться для дальнейшего нагрева в системе горячего водоснабжения или полива приусадебного участка.

**ВЫВОДЫ**

Одним из эффективных способов кондиционирования воздуха для жилых домов является использование артезианской воды для системы холодоснабжения. Предложена схема использования артезианской воды в системе кондиционирования и выполнена разработка предложений относительно дальнейшего использования артезианской воды на хозяйственные нужды. Дана оценка эффективности предложенного метода.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Кокорин, О. Я. Энергосберегающие технологии функционирования систем вентиляции и кондиционирования воздуха [Текст] / О. Я. Кокорин. – М. : Проспект, 1999. – 287 с.

2. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика [Текст] / В. А. Ананьев, Л. М. Балужева, А. Л. Гальперин [и др.]. – М. : Евроклимат, 2001. – 416 с.
3. Экономическая эффективность энергосбережения в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха [Текст] : Учебное пособие / А.И. Еремкин, Т. И. Королева, Г. В. Данилин [и др.]. – М. : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2008. – 184 с.
4. Баркалов, Б. В. Кондиционирование воздуха в промышленных, общественных и жилых зданиях [Текст] / Б. В. Баркалов, Е. Е. Карпис. – М. : Стройиздат, 1982. – 312 с.
5. Морозюк, Т. В. Теория холодильных машин и тепловых насосов [Текст] / Т. В. Морозюк. – Одесса : Студия «Негоциант», 2006. – 712 с.

Получено 02.09.2015

**Н. А. МАКСИМОВА, О. В. ШАЙХЕД**  
**СИСТЕМА КОНДИЦІОНУВАННЯ ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ З**  
**ВИКОРИСТАННЯМ АРТЕЗІАНСЬКОЇ ВОДИ**  
Донбаська національна академія будівництва і архітектури

Розроблено метод використання холоду артезианської води для системи кондиціонування повітря житлового будинку. Проаналізовано можливості та переваги цих систем, дана оцінка ефективності запропонованої системи.

**енергозбереження, охолодження, артезианська вода, холодоагент, кондиціонер**

**NATALYA MAKSIMOVA, OLGA SHAYHED**  
**THE AIR CONDITIONING SYSTEM OF AN APARTMENT HOUSE WITH**  
**ARTESIAN WATER**  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Method of cold of artesian water usage for the air conditioning system of a apartment building has been developed. Analyzed the possibilities and advantages of these systems, evaluate the effectiveness of the proposed system.

**energy saving, cooling, artesian water, refrigerant, air conditioning**

**Максимова Наталя Анатоліївна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: розробка термотрансформаторів та теплових насосів, енергоресурсоощадження.

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

**Максимова Наталья Анатольевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: разработка термотрансформаторов и тепловых насосов, энергоресурсосбережение.

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

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

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

УДК 628.368

**В. И. ЗЯТИНА**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## **ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В КОЛОННЕ ОСВЕТИТЕЛЯ ВО ВЗВЕШЕННОМ СЛОЕ ОСАДКА**

Методом конечных разностей решена стационарная двумерная задача движения жидкости в колонне осветителя со взвешенным слоем осадка, построены линии ток обрабатываемой жидкости в корпусе сооружения.

**активный ил, осветитель, илоотделитель, циркуляция, уравнение Навье-Стокса, линии тока**

### **ВВЕДЕНИЕ**

В основной массе городских очистных сооружений России, Украины и других пост-социалистических государств в качестве основного метода обработки сточных вод применяется тандем полной биологической очистки и вторичного отстаивания, при котором отделение активного ила от обрабатываемой жидкости осуществляется в поле гравитационных сил [1]. Этот метод имеет существенные ограничения по концентрации отделяемого ила и нагрузкам на поверхность отстойника, что приводит к снижению пропускной способности.

Объем образующихся в процессе очистки сточных вод осадков в зависимости от концентрации загрязнений в исходной воде и расхода сточных вод составляет 0,5...11,0 % от объема сточной воды, из которых основной объем занимает избыточный активный ил [2].

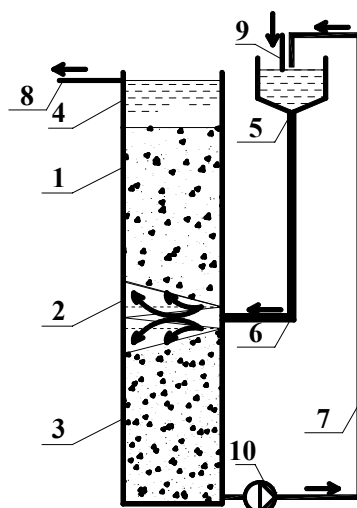
Обработка осадков, а именно избыточного активного ила, имеет массу решений, одним из которых является способ продленной аэробной минерализации [3], в котором нашел свое применение метод илоотделения во взвешенном слое осадка [4]. Метод основан на распределении потоков рабочей смеси между верхней частью, зоной действия взвешенного слоя и нижней частью, зоной рециркуляции рабочей жидкости.

В предлагаемой работе рассмотрена циркуляция жидкости в колонне осветителя со взвешенным слоем осадка применительно к циркуляции смеси обрабатываемого активного ила и иловой воды (рис. 1).

**Целью данной работы** является математическое моделирование процесса распределения обрабатываемой смеси, формирование восходящих и нисходящих потоков, определение кинетических параметров газожидкостной смеси на входе в сооружение илоотделения.

Динамика потоков смеси обрабатываемого осадка в жидкой среде при входе в сооружение по илоотделению во взвешенном слое осадка представляет огромный интерес к пониманию процессов, протекающих на границе раздела верхней и нижней зон илоотделителя. Процесс на данной конструкции илоотделителей не изучен должным образом.

На основании лабораторных экспериментов на смоделированной установке осветителя со взвешенным слоем осадка, приведенном выше, установлено оптимальное значение восходящей и нисходящей скорости смеси при строго фиксированной нагрузке [5]. Для различных нагрузок данные показатели различны. Данные предыдущих экспериментов легли в основу данного математического моделирования, но конечной целью представляется определение стационарного решения при работе с любыми начальными параметрами.



**Рисунок 1** – Корпус осветлителя со взвешенным слоем жидкости: 1 – взвешенный слой минерализованного активного ила; 2 – ввод и распределение потоков в илоотделителе; 3 – осаждение и отвод минерализованного активного ила; 4 – защитный слой илоотделителя; 5 – сооружение минерализации активного ила; 6 – подача активного ила на минерализацию; 7 – рециркуляция активного ила; 8 – отвод осветленной воды перед аэротенками; 9 – подача активного ила на минерализацию; 10 – иловый насос.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Уравнение Навье-Стокса для вертикальной и горизонтальной составляющих размерных скоростей [1]:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \bar{v} \left( \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right), \quad (1a)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \bar{v} \left( \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right). \quad (1b)$$

Здесь и далее размерные величины обозначены чертой сверху (только те, которые используются и в безразмерном виде).

Имеем два уравнения с тремя неизвестными  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{P}$ . Чтобы замкнуть систему, к уравнениям Навье-Стокса присоединяют уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0. \quad (2)$$

Начальные условия не имеют существенного значения, поскольку ищется стационарное решение.

### РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Продифференцировав (2a) по  $y$  и (2b) по  $x$ , исключив давление и определив вихрь как

$$\bar{\zeta} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \frac{\partial \bar{v}}{\partial x}, \quad (3)$$

получим уравнение переноса вихря

$$\frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial t} = -\bar{u} \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial x} - \bar{v} \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial y} + \bar{v} \left( \frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial y^2} \right). \quad (4a)$$

Это же уравнение в консервативной форме [2]:

$$\frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial t} = -\frac{\partial (\bar{u} \bar{\zeta})}{\partial x} - \frac{\partial (\bar{v} \bar{\zeta})}{\partial y} + \bar{v} \left( \frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial y^2} \right). \quad (4b)$$

Консервативная форма записи конечно-разностного уравнения обеспечивает выполнение интегральных законов сохранения, справедливых для исходных дифференциальных уравнений.

Определяя функцию тока  $\bar{\psi}$  соотношениями

$$\frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{y}} = \bar{u}, \quad \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{x}} = -\bar{v}, \quad (5)$$

уравнение (3) записываем в виде

$$\frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial \bar{y}^2} = \bar{\zeta}. \quad (6)$$

Введя безразмерные величины  $u = \bar{u} / \bar{U}_0$ ,  $v = \bar{v} / \bar{U}_0$ ,  $x = \bar{x} / \bar{L}$ ,  $y = \bar{y} / \bar{L}$ ,  $\zeta = \bar{\zeta} \bar{L} / \bar{U}_0$ ,  $t = \bar{t} \bar{U}_0 / \bar{L}$ , приведем уравнения (4b) и (3) к безразмерному виду:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{\partial(u\zeta)}{\partial x} - \frac{\partial(v\zeta)}{\partial y} + \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right), \quad (7)$$

$$\zeta = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}. \quad (8)$$

Компьютерная программа реализует итерационный процесс метода Гаусса-Зайделя [2]. Направление обхода узлов координатной сетки циклически изменяется, как показано на рис. 2.

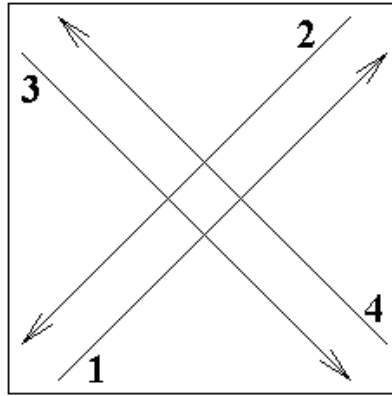


Рисунок 2 – Последовательность обхода узлов координатной сетки.

Уравнение (7) в конечных разностях (верхний индекс при  $\zeta$ ,  $\psi$ ,  $u$ ,  $v$  – номер шага времени, нижние индексы – номера ячеек: первый – по горизонтали, второй – по вертикали):

при  $i \uparrow, j \uparrow$

$$\zeta_{i,j}^{n+1} = \zeta_{i,j}^n - \frac{\tau}{2\xi} (u_{i+1,j}^n \zeta_{i+1,j}^n - u_{i-1,j}^n \zeta_{i-1,j}^n) - \frac{\tau}{2\eta} (v_{i,j+1}^n \zeta_{i,j+1}^n - v_{i,j-1}^n \zeta_{i,j-1}^n) + \frac{\tau}{\text{Re}} \left( \frac{\zeta_{i+1,j}^n - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i-1,j}^{n+1}}{\xi^2} + \frac{\zeta_{i,j+1}^n - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i,j-1}^{n+1}}{\eta^2} \right); \quad (9a)$$

при  $i \downarrow, j \downarrow$

$$\zeta_{i,j}^{n+1} = \zeta_{i,j}^n - \frac{\tau}{2\xi} (u_{i+1,j}^n \zeta_{i+1,j}^n - u_{i-1,j}^n \zeta_{i-1,j}^n) - \frac{\tau}{2\eta} (v_{i,j+1}^n \zeta_{i,j+1}^n - v_{i,j-1}^n \zeta_{i,j-1}^n) + \frac{\tau}{\text{Re}} \left( \frac{\zeta_{i+1,j}^{n+1} - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i-1,j}^n}{\xi^2} + \frac{\zeta_{i,j+1}^{n+1} - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i,j-1}^n}{\eta^2} \right); \quad (9b)$$

при  $i \uparrow, j \downarrow$

$$\zeta_{i,j}^{n+1} = \zeta_{i,j}^n - \frac{\tau}{2\xi} (u_{i+1,j}^n \zeta_{i+1,j}^n - u_{i-1,j}^n \zeta_{i-1,j}^n) - \frac{\tau}{2\eta} (v_{i,j+1}^n \zeta_{i,j+1}^n - v_{i,j-1}^n \zeta_{i,j-1}^n) + \frac{\tau}{\text{Re}} \left( \frac{\zeta_{i+1,j}^n - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i-1,j}^{n+1}}{\xi^2} + \frac{\zeta_{i,j+1}^{n+1} - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i,j-1}^n}{\eta^2} \right); \quad (9c)$$

при  $i \downarrow, j \uparrow$

$$\zeta_{i,j}^{n+1} = [\zeta_{i,j}^n - \frac{\tau}{2\xi} (u_{i+1,j}^n \zeta_{i+1,j}^n - u_{i-1,j}^n \zeta_{i-1,j}^n) - \frac{\tau}{2\eta} (v_{i,j+1}^n \zeta_{i,j+1}^n - v_{i,j-1}^n \zeta_{i,j-1}^n) + \frac{\tau}{\text{Re}} \left( \frac{\zeta_{i+1,j}^{n+1} - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i-1,j}^n}{\xi^2} + \frac{\zeta_{i,j+1}^n - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i,j-1}^{n+1}}{\eta^2} \right)]. \quad (9d)$$

Функцию тока  $\psi$  находим итерационным методом Ричардсона [1]:

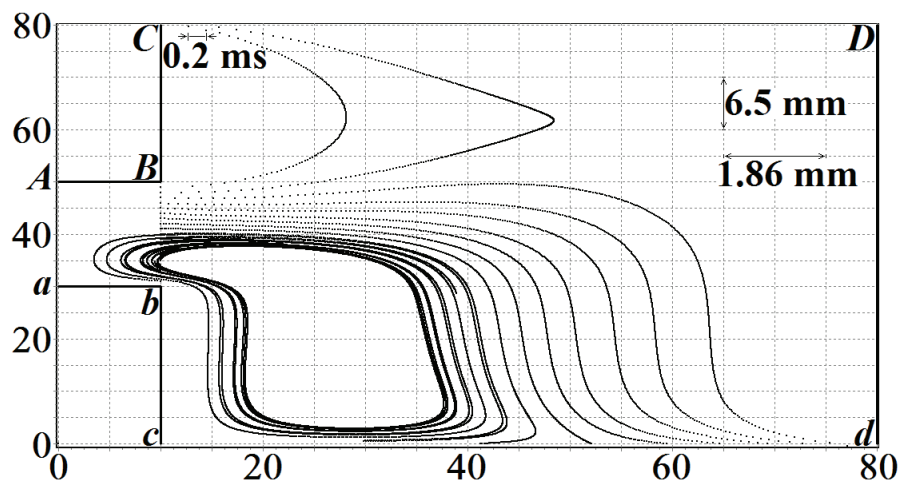
$$\psi_{i,j}^{k+1} = \frac{1}{2(1+\beta^2)} (\psi_{i+1,j}^k + \psi_{i-1,j}^k + \beta^2 \psi_{i,j+1}^k + \beta^2 \psi_{i,j-1}^k - \xi^2 \zeta_{i,j}), \quad (10)$$

где  $\beta = \xi / \eta$  – отношение размеров сетки.

Начальные условия берем в виде:

$$u_{i,j}^0 = 0; v_{i,j}^0 = 0; \zeta_{i,j}^0 = 0; \psi_{i,j}^0 = 0. \quad (11)$$

Наиболее сложным моментом в решении задачи является задание граничных условий [2]. Функция тока для стенок (условие с прилипанием): для участка  $abc$  (рис. 3)  $\psi_{i,j} = 0$ , для участка  $ABC$   $\psi_{i,j} = 1$ , для участка  $Dd$   $\psi_{i,j} = 1 - Q_u / Q_d$ , где  $Q_u$  – расход в колонне осветлителя выше трубы входа,  $Q_d$  – расход в колонне осветлителя ниже трубы входа. Вихрь для стенок: для участка  $ab$   $\zeta_{i,j} = 2(\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j}) / \eta^2$ , для участка  $AB$   $\zeta_{i,j} = 2(\psi_{i,j-1} - \psi_{i,j}) / \eta^2$ , для участка  $Dd$   $\zeta_{i,j} = 2(\psi_{i-1,j} - \psi_{i,j}) / \xi^2$ , для участков  $BC$  и  $bc$   $\zeta_{i,j} = 2(\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j}) / \xi^2$ . Вихрь для угловой точки  $B$  в разностном уравнении, записанном для узла  $(i, j-1)$ ,  $\zeta_{i,j} = 2\psi_{i,j-1} / \eta^2$ , а в разностном уравнении, записанном для узла  $(i+1, j)$ ,  $\zeta_{i,j} = 2\psi_{i+1,j} / \xi^2$ . Вихрь для угловой точки  $b$  в разностном уравнении, записанном для узла  $(i, j+1)$ ,  $\zeta_{i,j} = 2\psi_{i,j+1} / \xi^2$ , а в разностном уравнении, записанном для узла  $(i+1, j)$ ,  $\zeta_{i,j} = 2\psi_{i+1,j} / \xi^2$ . На входе  $Aa$  функция тока  $\psi_{i,j} = \psi_{i+1,j}$ . На выходе  $CD$ : функция тока  $\psi_{i,j} = 2\psi_{i,j-1} - 2\psi_{i,j-2}$ , вихрь  $\zeta_{i,j}^{n-1} = \zeta_{i,j-1}^{n-1} = 0$ . На выходе  $cd$ : функция тока  $\psi_{i,j} = 2\psi_{i,j+1} - 2\psi_{i,j+2}$ , вихрь  $\zeta_{i,j}^{n-1} = \zeta_{i,j+1}^{n-1} = 0$ .



**Рисунок 3** – Линии тока. Начальные точки взяты на входе в колонну осветлителя с одинаковым шагом по вертикали. Масштаб координаты вдоль оси  $x$  – 1,86 мм на 10 шагов координатной сетки, масштаб координаты вдоль оси  $y$  – 6,5 мм на 10 шагов координатной сетки, метки времени через 0,2 мс.

Уравнение решается методом последовательных приближений [3]. Компьютерная программа составлена в среде Delphi на языке Object Pascal.

Неустойчивости решения, зарождающиеся на входной границе, распространяются вниз по потоку, а неустойчивости, зарождающиеся на выходной границе – вверх по потоку. Численное решение даёт результаты, согласующиеся с физическим экспериментом, лишь в том случае, когда вход и выход потока находятся достаточно далеко от интересующей нас области, в идеале на бесконечности. На рис. 3 показаны линии тока, получаемые при условии, что начальные точки взяты не у границы координатной сетки, соответствующей входу потока ( $i = 0$ ), а на удалении 10 ячеек от неё, с одинаковым шагом  $L/10$  по вертикали. Следует также принимать во внимание наличие искажений, вызванных неустойчивостями на выходах.

Начальные расчетные параметры взяты исходя из опытных данных лабораторно смоделированного осветлителя со взвешенным слоем осадка. Приняты наиболее оптимальные и устойчивые параметры.

Параметры расчёта:

$L = D_s = 0,013$  м – характерный размер (диаметр подводящей трубы);

$D_c = 0,095$  м – диаметр колонны осветлителя;

$Q_c = 0,25$  м<sup>3</sup>/ч =  $6,94 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/с – расход через подводящую трубу;

$\mu = 1,30 \cdot 10^{-3}$  Па·с – динамическая вязкость;

$\rho = 1\,000$  кг/м<sup>3</sup> – плотность;

$e = 1/1\,000$  – относительная погрешность итераций;

$t_i = 200$  мкс – интервал времени между точками на линии тока;

$Q_d/Q = 80$  % – доля входного расхода, идущая вниз;



$U_0 = U_s = 523 \text{ mm/s}$  – характерная скорость (скорость в подводящей трубе);

$U_d = 57,3 \text{ mm/s}$  – скорость в нижней части колонны;

$U_u = 14,3 \text{ mm/s}$  – скорость в верхней части колонны;

$\nu = 1,30 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  – кинематическая вязкость;

$Re_s = U_s D_s / \nu = 5\,232$  – число Рейнольдса для подводящей трубы;

$Re_d = U_d D_d / \nu = 4\,186$  – число Рейнольдса для нижней части колонны;

$Re_u = U_u D_u / \nu = 1\,046$  – число Рейнольдса для верхней части колонны;

$Fr_s = U_s^2 / (g D_s) = 2,15$  – число Фруда для подводящей трубы;

$Fr_d = U_d^2 / (g D_d) = 0,00352$  – число Фруда для нижней части колонны;

$Fr_u = U_u^2 / (g D_u) = 0,00022$  – число Фруда для верхней части колонны (up);

$q_a = 20$  – число шагов координаты вдоль диаметра подводящей трубы;

$q_l = 10$  – число шагов координаты вдоль длины подводящей трубы;

$\xi = 0,0143$  – безразмерный шаг координаты вдоль оси  $x$ ;

$\bar{\xi} = \xi L = 0,0143 \cdot 13 \text{ mm} = 0,186 \text{ mm}$  – размерный шаг координаты вдоль оси  $x$ ;

$\eta = 0,0500$  – безразмерный шаг координаты вдоль оси  $y$ ;

$\bar{\eta} = \eta L = 0,0500 \cdot 13 \text{ mm} = 0,650 \text{ mm}$  – размерный шаг координаты вдоль оси  $y$ ;

$\tau = 0,000179$  – безразмерный шаг итераций;

$\psi_L = 1,00$  – функция тока на левой стенке потока в подводящей трубе;

$\psi_o = 0,75$  – функция тока в правой части колонны;

$\rho = 1\,000 \text{ kg/m}^3$  – плотность жидкости;

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$  – ускорение свободного падения.

Число шагов координатной сетки по горизонтали 80, по вертикали – 80, шаг координаты вдоль оси  $x$  – 0,186 mm, шаг координаты вдоль оси  $y$  – 0,65 mm. В формулы (9) подставляем значение числа Рейнольдса  $Re = Re_s = 5\,232$ .

## ВЫВОДЫ

Анализ результатов расчёта, представленных на графике рис. 3, показывает, что на входе потока в колонну осветлителя возникает интенсивное вихревое движение жидкости, способствующее активному её перемешиванию. Что в значительной степени способствует обновлению взвешенного слоя, исключая появление застойных и неподвижных зон.

Определен режим движения смеси на входе в сооружение, характеризуемый числом Рейнольдса  $Re = 5\,232$ , режим движения турбулентный. В самом взвешенном слое, в верхней его части  $Re = 1\,046$  – ламинарный режим движения смеси.

Разработанная компьютерная программа позволяет подобрать параметры и режимы работы осветлителя на стадии проектирования. А именно установить граничные показатели восходящей и нисходящей скорости потока обрабатываемой смеси.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ

Если используются размерные и безразмерные значения величины, то размерная величина выделяется верхним подчёркиванием:  $D$  – диаметр, м;  $e$  – относительная погрешность итераций;  $Fr$  – число Фруда;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{m/s}^2$ ;  $L, \bar{L}$  – характерный размер;  $Q$  – расход,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $q$  – число шагов координаты;  $Re$  – число Рейнольдса;  $t, \bar{t}$  – время, с;  $U_0, \bar{U}_0$  – характерная скорость,  $\text{m/s}$ ;  $u, \bar{u}$  – горизонтальная составляющая скорости,  $\text{m/s}$ ;  $v, \bar{v}$  – вертикальная составляющая скорости,  $\text{m/s}$ ;  $x, y, \bar{x}, \bar{y}$  – координаты, м;  $\beta$  – отношение размеров сетки;  $\zeta, \bar{\zeta}$  – вихрь,  $\text{s}^{-1}$ ;  $\bar{\eta}, \eta$  – шаг координаты по вертикали, м;  $\bar{\nu}$  – кинематическая вязкость,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $\mu$  – динамическая вязкость,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $\xi, \bar{\xi}$  – шаг координаты по горизонтали, м;  $\bar{\rho}$  – плотность,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\tau$  – шаг итераций по времени, с;  $\psi, \bar{\psi}$  – функция тока,  $\text{m}^2/\text{s}$ . Индексы: а – across; с – колонна осветлителя (column); d – часть колонны осветлителя ниже трубы ввода (down); i – интервал времени (interval); i, j – номера расчётных ячеек по горизонтали и по вертикали; L – левый (left); l – длина (length); k – номер итерации; n – номер шага времени; o – стенка колонны противоположная трубе ввода (opposite); s – подводящая труба (supply); u – часть колонны осветлителя выше трубы ввода (up).

Анализ результатов расчёта, представленных на графике рис. 3, показывает, что на входе потока в колонну осветлителя возникает интенсивное вихревое движение жидкости, способствующее активному её перемешиванию. Разработанная компьютерная программа позволяет подобрать параметры и режимы работы осветлителя на стадии проектирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернишев, В. М. Технологія роботи муловідділювача у технології глибокої мінералізації осаду [Текст] / В. М. Чернишев, В. І. Зятіна // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2013. – Вип. 2013-5(103) : Інженерні системи та техногенна безпека. – С. 21–25.
2. Мовчан, С. І. Технология утилизации осадков гальванических производств [Текст] / С. И. Мовчан, Н. И. Бунин // Вісник Харківської академії комунального господарства : Научно-технический сборник. – Харків : ХНАМГ, 2004. – № 60. – С. 148–151.
3. Пат. 94152 Україна, МПК C02F 11/00, C02F 11/02. Спосіб обробки осадів міських стічних вод [Текст] / Нездойминов В. І., Чернишев В. М., Кіжаєв В. Ф., Нудненко А. М. ; заявник та володар ДонНАБА. – № а2009 09239 ; заявл. 08.09.2009 ; опубл. 11.04.11, Бюл. № 7. – 4 с.
4. Пат. 101528 України, МПК C02F 11/02. Спосіб муловідділення для мінералізованого активного мулу [Текст] / Нездойминов В. І., Чернишев В. М., Зятіна В. І., Дмитров П. О., Голдін І. Ю. ; власники Нездойминов В. І., Чернишев В. М., Зятіна В. І., Дмитров П. О., Голдін І. Ю. – № у 2014 05525 ; заявл. 23.05.2014 ; опубл. 25.09.2015, Бюл. № 18. – 2 с.
5. Чернишев, В. М. Исследования работы илоотделителя в технологии глубокой минерализации осадка [Текст] / В. М. Чернишев, В. І. Зятіна // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2013. – Випуск 2013-3(101) : Будівлі та конструкції із застосуванням нових матеріалів та технологій. – С. 85–89.
6. Роуч, П. Вычислительная гидродинамика [Текст] / П. Роуч. – М. : Мир, 1980. – 616 с.
7. Безуглый, В. Ю. Численные методы теории конвективного теплообмена [Текст] / В. Ю. Безуглый, Н. М. Беляев. – Киев-Донецк : Вища школа, 1984. – 176 с.

Получено 03.09.2015

В. І. ЗЯТИНА

РУХ РІДИНИ У КОЛОНІ ОСВІТЛЮВАЧА ІЗ ЗАВИСЛИМ ШАРОМ ОСАДУ

Донбаська національна академія будівництва і архітектури

Методом кінцевих різниць розв'язана нестационарна двовимірна задача руху рідини в колоні освітлювача зі зваженим шаром осаду, побудовані лінії струму оброблюваної рідини в корпусі споруди.  
**активний мул, освітлювач, муловідділення, циркуляція, рівняння Нав'є-Стокса, лінії струму**

VITALII ZIATINA

MOVEMENT OF THE FLUID IN THE COLUMN CLARIFIER WITH A SUSPENDED SEDIMENT LAYER

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

The time-invariant two dimensional problem of fluid motion in the column of clearing agent having sludge blanket has been solved by the finite-difference method, the current lines of treated water in the body structure have been built.

**activated sludge, clarifier desilter, circulation, the Navier-Stokes equations, the current lines**

**Зятіна Віталій Ілліч** – аспірант, асистент кафедри водопостачання, водовідведення та охорони водних ресурсів Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: розробка нових та удосконалення технологій водопостачання та водовідведення. Опрацювання основних принципів біологічних процесів, для стічних вод.

**Зятіна Віталій Ільич** – аспірант, асистент кафедри водоснабження, водоотведения и охраны водных ресурсов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: разработка новых и усовершенствование технологий водоснабжения и водоотведения. Проработка основных принципов биологических процессов, для сточных вод.

**Ziatina Vitalii** – post-graduate student, assistant, Water Supply, Water Disposal and Water Resources Conservation and Protection Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: the development of new technologies and improvement of water supply and sewer. Study of the basic principles of biological processes of wastewater.

УДК 711.4+332.624

**А. В. МИХАЙЛОВ**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## **ОЦЕНКА ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИХ ТРАНСФОРМАЦИЮ**

В статье рассмотрены и проанализированы разновидности комплексной оценки городских территорий. Проанализированы факторы, влияющие на стоимость городских земель по каждому критерию. Приведены задачи комплексной оценки территории. Выбраны основные факторы, влияющие на оценку трансформируемых территорий.

**оценка городских территорий, комплексная оценка, кадастровая оценка, стоимостная оценка, нормативная денежная оценка, городские функции, экспертная оценка**

Землями поселений признаются территории, используемые и предназначенные для застройки и развития городских и сельских поселений и отделенные их чертой от земель других категорий. Земли поселений используются в соответствии с генпланом и проектом планировки и застройки и выполняют культурно-бытовые, рекреационные, оздоровительные и другие функции.

Достоверная оценка городских территорий способствует принятию эффективных решений в области земельных отношений как в государственном, так и частном секторе. Градостроители и экономисты уже давно осознали, что отсутствие оценки территорий приводит к неэффективному землепользованию и нежелательной модели городского развития, например к строительству в центре городов промышленных предприятий, а это, в свою очередь, приводит к существенным финансовым потерям в муниципальных и городских бюджетах [6].

Пригодность участков для жилищного, промышленного, складского строительства, парков, скверов, культурно-бытовых центров и других видов городских функций оценивается по комплексу факторов [2, 3]. На основании этих факторов можно ту или иную конкретную территорию, предназначенную для развития существующего или нового строительства, преобразовать под другие виды городских функций, поэтому необходима предварительная аналитическая работа различных специалистов разного профиля (градостроителей, климатологов, инженеров, ландшафтных архитекторов и др.), которая является задачей для проектирования.

Аналитическая работа очень важна для постановки задач и учета максимально возможных факторов при оценке городских территорий и приведет проектировщика к наиболее точному решению поставленных задач. На рисунке 1 приведена блок-схема процесса оценки городских территорий, в которой рассматривается поэтапное построение поставленных задач.

На **I этапе** производится выбор объекта трансформации для последующего его анализа. Рассматриваемым объектом трансформации может выступать сам город (его полная реконструкция), функциональные зоны, городские функции и т. д.

На **II этапе** при оценке территории зачастую рассматривают и используют различное множество факторов для решения поставленных задач при проектировании или реконструкции. При этом в пределах выбранного участка территории города производится дифференциальный ее анализ.

Выбор факторов зависит от поставленных задач перед проектировщиками и их можно классифицировать на:

- факторы нормативной денежной оценки 1 м<sup>2</sup> территории (рис. 2) [5];
- градостроительные факторы оценки территории (рис. 3) [8, 9, 10];
- факторы оценки конкретной городской функции (рис. 4) [4, 7].

© А. В. Михайлов, 2015

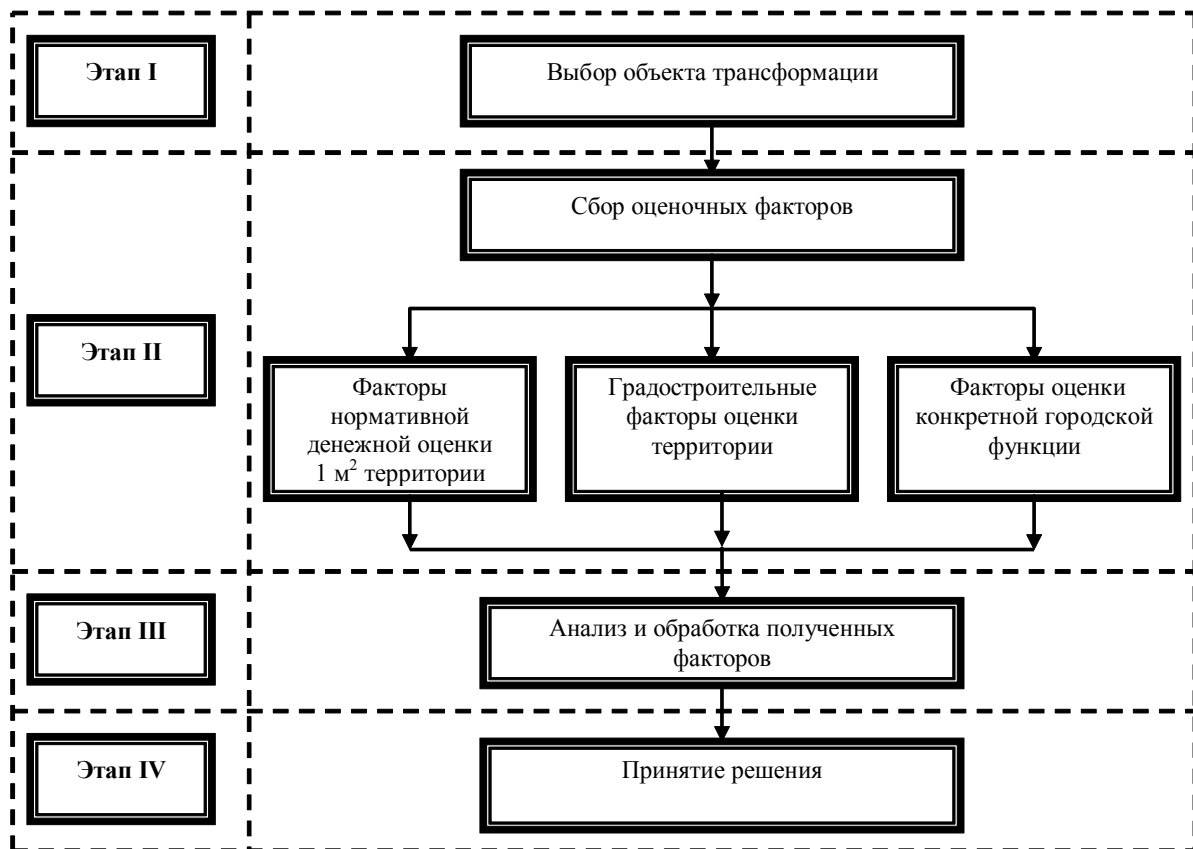


Рисунок 1 – Блок-схема процесса оценки городских территорий.

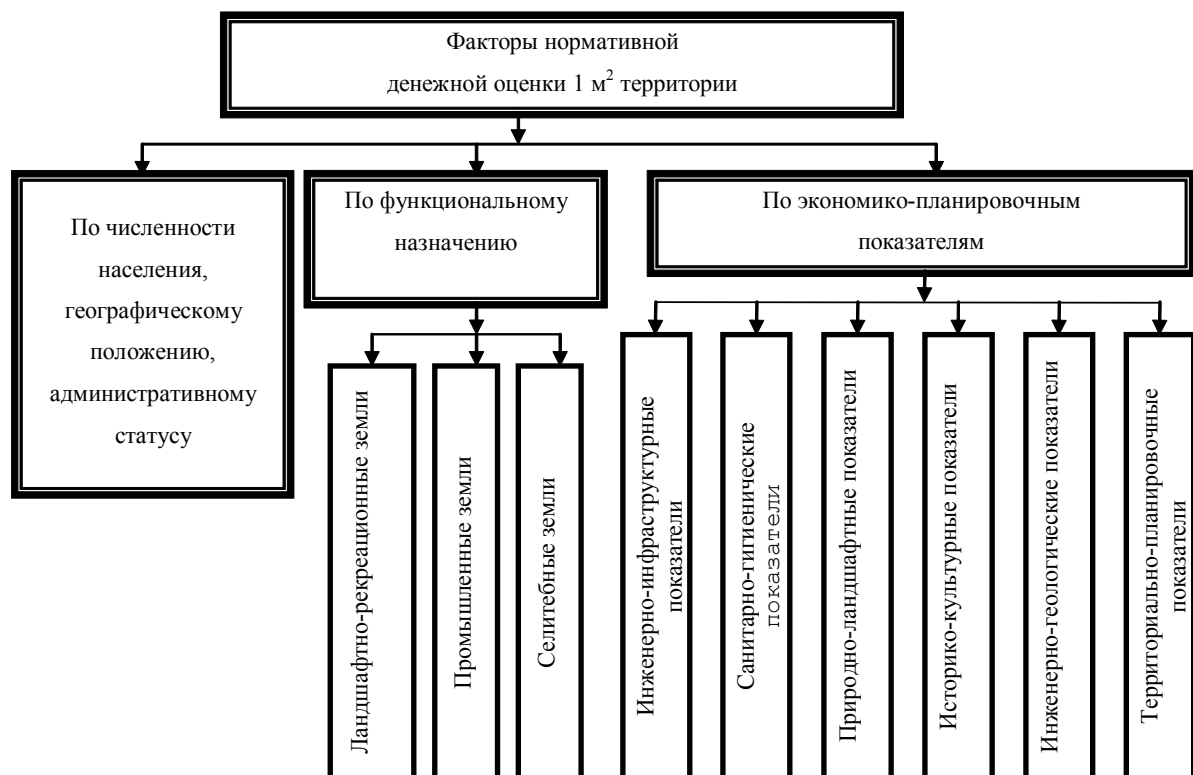


Рисунок 2 – Факторы нормативной денежной оценки 1 м² территории.

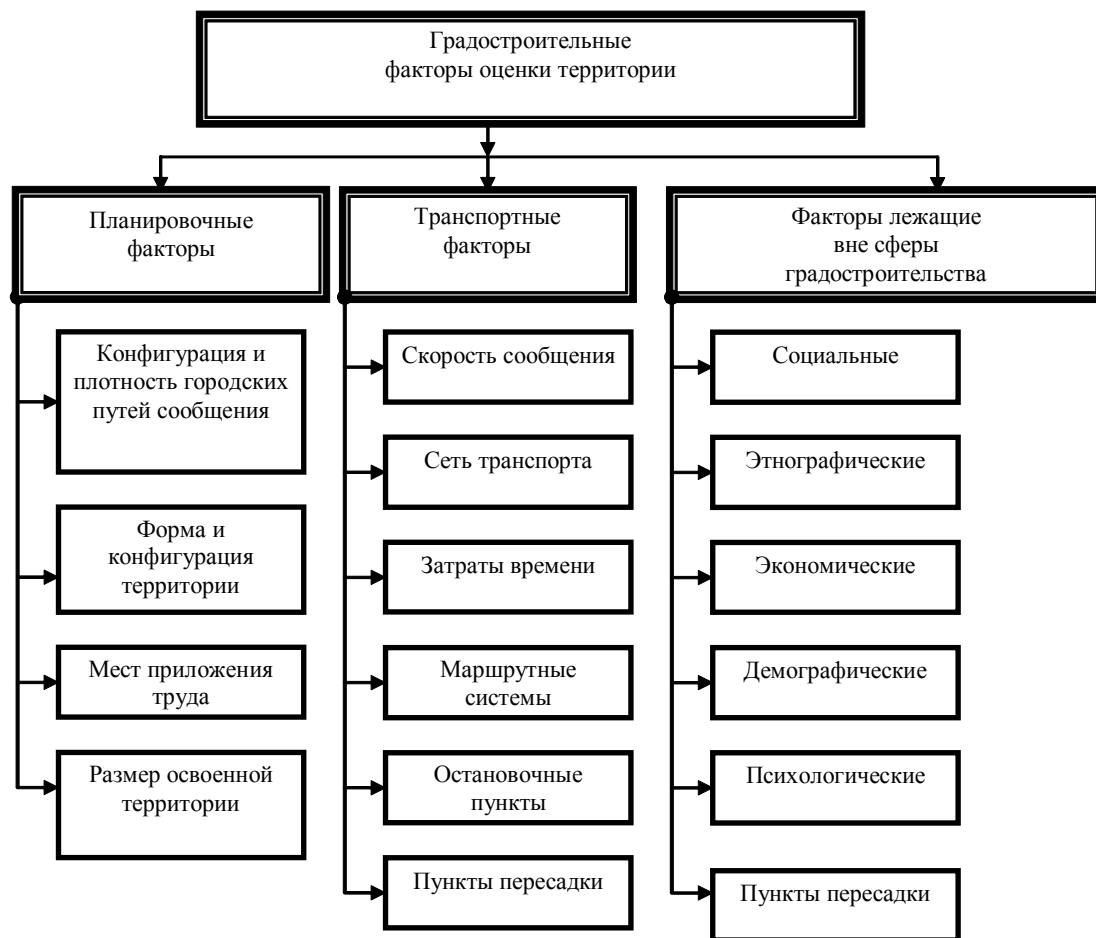


Рисунок 3 – Градостроительные факторы оценки территории.

После сбора комплекса факторов наступает **III этап**, в котором полученные значения различных факторов поддаются тщательному анализу и обработке. На выходе результаты дифференцированного анализа территории оцениваются и обобщаются в единый общий показатель.

Получив на **IV этапе** комплексные показатели оцениваемой территории, принимают окончательное решение о возможном развитии рассматриваемой территории.

Такой подход к изучению городских территорий становится основой для ее **комплексной градостроительной оценки**, по результатам которой определяют пригодность выбранной площадки под определенный вид функционального использования.

Задачи комплексной оценки территории обусловлены проблемами, которые должны быть решены на данной стадии проектирования, и заключаются в следующем [1]:

- найти территориальные ресурсы для развития выбранных видов народнохозяйственного использования территории или для размещения отдельных крупных промышленных, гражданских и других комплексов, технических коммуникаций и сооружений;
- выявить свойства территории, ограничивающие и осложняющие развитие того или иного вида ее использования;
- определить виды хозяйственной деятельности, обеспечивающие выполнение главных задач планировки на территории города.

Комплексная оценка территории может производиться на основе простой и дифференцированной балльной, стоимостной и смешанной оценок. Наиболее точная – стоимостная оценка, основанная на определении сравнительных удорожаний по каждому рассматриваемому фактору в зависимости от вида хозяйственной деятельности.

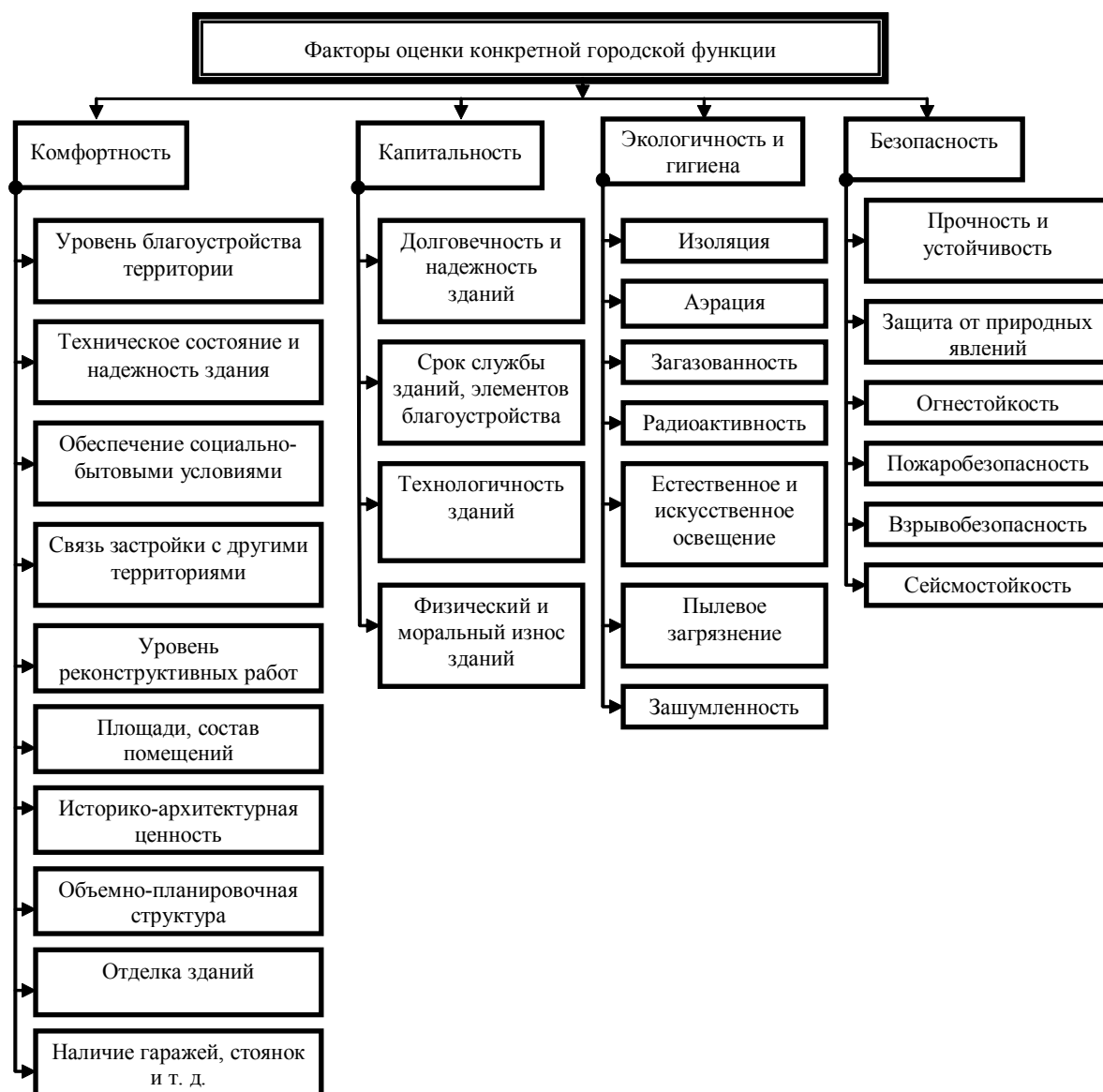


Рисунок 4 – Факторы оценки конкретной городской функции.

Стоимостная оценка городских территорий также является **кадастровой**, которая проводится по всем категориям и видам использования городских земель независимо от форм собственности. Порядок использования земель поселений определяется в соответствии с зонированием их территорий. Основные территориальные зоны следующие: жилые, общественно-деловые, инженерной и транспортной инфраструктуры, производственные, рекреационные, сельскохозяйственного использования, военных объектов и специального назначения.

Под кадастровой оценкой городской земли понимается совокупность административных и технических действий по установлению кадастровой стоимости земельных участков административно-территориального образования в границах кадастровых кварталов (кластеров).

Кадастровая оценка городских земель осуществляется на основе комплексного использования доходного, сравнительного и затратного подходов, основывающихся на информации о сделках на рынке земли и иной недвижимости, уровне арендной платы и доходности использования земельных участков.

Стоимостная оценка основана на сложении стоимостных показателей оценочных районов (участков) при их наложении друг на друга. В качестве критериев стоимостной оценки по тому или иному свойству принимаются частные коэффициенты оценки, а по каждому фактору и совокупности

факторов – общие коэффициенты оценки (сравнительные удорожания в % к базовой стоимости – строительства, сельскохозяйственного или рекреационного освоения 1 га территории). Они получены из сопоставления базовой стоимости освоения 1 га территории для того или иного вида использования со стоимостными показателями, характеризующими затраты на проведение дополнительных мероприятий по инженерной подготовке территории, привлечению водных ресурсов, облесению, необходимому транспортному строительству и т. д.

Частные коэффициенты оценки определяют интервалы шкал стоимостных показателей по отдельным свойствам, а общие коэффициенты – по отдельным факторам и группам факторов [1].

В традиционной практике градостроительного проектирования решение задач комплексной оценки и функционального зонирования территории базируется на различных модификациях экспертных оценок.

Простейшим приемом оценки территории для целей функционального зонирования территории является ее дифференциация по степени пригодности на три категории: пригодные, ограниченно пригодные, непригодные. Такая дифференциация является слишком грубой и неполной и встречается в проектной практике все реже.

На смену ей почти повсеместно пришла экспертная оценка территории в балльной форме. Суть ее состоит в том, что определяется перечень существенных факторов и по каждому существенному фактору осуществляется оценка территории путем ее разделения на оценочные ареалы и присвоения каждому из ареалов величины оценки в виде числа баллов – таким образом, что большее число баллов означает более благоприятные условия для освоения под застройку. Такого рода пофакторные оценки осуществляются в графической форме различными графическими обозначениями.

Во многих случаях работа выполняется на бумажной подоснове и в таком виде служит общим ориентиром для принятия решений по функциональному зонированию территории. По существу, здесь мы имеем дело не с комплексной оценкой, а с совокупностью пофакторных оценок. Характер использования материалов такого рода при оценке функционального зонирования территории никак не регламентирован и не формализован и осуществляется на основе опыта и интуиции проектировщика.

В других случаях при осуществлении графических работ для пофакторной оценки используются компьютерные средства, а результаты пофакторной оценки используются для формирования **сводной комплексной оценки территории**. Для этого осуществляется их взаимное наложение (суперпозиция), определяются ареалы пересечения пофакторных оценок, и сводная оценка каждого из ареалов формируется суммированием баллов, умноженных на **весовые коэффициенты факторов**, устанавливающие степень их важности для оценки. Основные элементы этого подхода – определение величин пофакторной оценки в баллах и определение весовых коэффициентов факторов – осуществляются на основе опыта и интуиции проектировщика.

Таким образом, в основе традиционной методики комплексной оценки территории в любых ее модификациях лежат экспертные оценки, в которых доминируют субъективные мнения конкретного проектировщика или проектного коллектива. Поскольку уровень объективности оценок невысок, степень доверия к ним также не очень высока.

Однако пространственное распределение основных функциональных процессов по территории носит достаточно сложный и неоднозначный характер. В одних частях города может локализоваться одна преобладающая функция и образуется монофункциональная территория. В других частях города могут совмещаться несколько функций, тогда образовывается полифункциональная территория. Решающим при этом является обособление одной из функций, требующей для себя каких-либо условий или осуществления на одной территории разных функций, дополняющих одна другую.

Можно сделать вывод, что научно-исследовательские работы в области разработки методов комплексной оценки территории немногочисленны и, так или иначе, представляют различные модификации балльного подхода, формализованные в большей или меньшей степени. Нормативные документы ограничиваются рекомендациями общего характера на вербальном уровне.

Использование тех или иных принципов оценки зависит от конкретной ситуации, складывающейся на момент оценки. Принципы оценки земельных участков тесно взаимосвязаны и в зависимости от используемого метода оценки могут играть основную или вспомогательную роль.

По мнению автора, одними из наиболее существенных факторов являются планировочно-транспортные. В настоящее время этим показателям мало уделяется внимание, т. к. сбор и анализ этих данных требует больших трудозатрат. В структуре города эти факторы играют значительную роль. Изучение этих показателей требует более тщательного подхода, что даст возможность получить, в

последствии, единый показатель, характеризующий транспортно-планировочные связи по всему городу.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Владимиров В. В. Районная планировка [Текст] / В. В. Владимиров, Н. И. Наймарк, Г. В. Субботин. – М. : Стройиздат, 1986. – 325 с. : ил. – (Справочник проектировщика).
2. Градостроительство [Текст] / Под общ. ред. В. Н. Белоусова. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1978. – 367 с. : с ил. – (Справочник проектировщика).
3. ДБН 360-92\*\*. Містобудування. Планування і забудова міських і сільських поселень [Текст]. – [Чинний від 2002-03-19]. – К. : Держбуд України, 2002. – (Державні будівельні норми України).
4. Лелюхина, А. М. Технология оценки городских земель [Текст] : Учебное пособие / А. М. Лелюхина. – М. : МИИГАиК, 2000. – 87 с. : ил.
5. Про порядок нормативної грошової оцінки земель сільськогосподарського призначення та населених пунктів [Текст] : Наказ Держкомзему України, Мінагрополітики України, Мінбудархітектури України, Української академії аграрних наук № 18/15/21/11 від 27.01.2006 : зареєстровано в Міністерстві юстиції України 5 квітня 2006 р. за № 388/12262 // Офіційний вісник України. – 2006. – № 15. – С. 154–168.
6. Петров, В. И. Оценка стоимости земельных участков [Текст] : учебное пособие / В. И. Петров ; под ред. д-ра экон. наук, проф. М. А. Федотовой. – М. : КНОРУС, 2007. – 2008 с.
7. Ромм, А. П. Комплексная оценка и функциональное зонирование территории в градостроительном проектировании (Методические основы и компьютерные технологии) [Текст] : дис. ... д-ра архитектуры : 18.00.04 / А. П. Ромм. – М., 2005. – 246 с.
8. Руководство по комплексной оценке и функциональному зонированию территории в районной планировке [Текст] / Центр. н.-и. и проект. ин-т по градостроительству Госгражданстроя. – М. : Стройиздат, 1979. – 94 с.
9. Сосновский, В. А. Прикладные методы градостроительных исследований [Текст] : Учеб. пособие / В. А. Сосновский, Н. С. Русакова. – М. : «Архитектура-С», 2006. – 112 с.
10. Черепанов, Б. В. Комплексная оценка вариантов работы транспортных систем в генеральных планах городов с использованием экспертных оценок [Текст] / Б. В. Черепанов, А. Б. Черепанов // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния : материалы X междунар. (тринадцатой екатеринбург.) науч.-практ. конф., 14–15 июня 2004 г. / [науч. ред. С. А. Ваксман]. – Екатеринбург : Издательство АМБ, 2004. – С. 18–25.

Получено 04.09.2015

О. В. МИХАЙЛОВ

#### ОЦІНКА МІСЬКИХ ТЕРИТОРІЙ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЇХ ТРАНСФОРМАЦІЮ

Донбаська національна академія будівництва і архітектури

У статті розглянуто та проаналізовано різновиди комплексної оцінки міських територій. Проаналізовано фактори, що впливають на вартість міських земель за кожним критерієм. Наведені завдання комплексної оцінки території. Обрані основні фактори, що впливають на оцінку трансформованих територій.

**оцінка міських територій, комплексна оцінка, кадастрова оцінка, вартісна оцінка, нормативна грошова оцінка, міські функції, експертна оцінка**

ALEXANDER MIKHAYLOV

#### ASSESSMENT OF URBAN AREAS AND THE IDENTIFICATION OF FACTORS THAT INFLUENCE ON THEIR TRANSFORMATION

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

The article deals with the variety of integrated assessment of urban areas. Factors, affecting on the cost of urban land for each criterion have been analyzed. The problems of comprehensive site assessment have been given. Key factors, influencing on the evaluation of transformed territories, have been chosen.

**assessment of urban areas, integrated assessment, cadastral valuation, valuation, regulatory pecuniary valuation, urban functions, expert evaluation**



**Михайлов Олександр Володимирович** – асистент кафедри міського будівництва та господарства Донбаської національної академії будівництва архітектури. Наукові інтереси: вивчення транспортних зв'язків в сучасних умовах в Донецькому регіоні, розробка і впровадження методики щодо вдосконалення міських повідомлень, обґрунтування методів вивчення містобудівних зв'язків.

**Михайлов Александр Владимирович** – ассистент кафедры городского строительства и хозяйства Донбасской национальной академии строительства архитектуры. Научные интересы: изучение транспортных связей в современных условиях в Донецком регионе, разработка и внедрение методики по усовершенствованию городских сообщений, обоснование методов изучения градостроительных связей.

**Mikhaylov Alexander** – assistant, Municipal Building and Economy Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: study of transport links in modern conditions in the Donetsk region, the development and implementation of methods for improving the city's communications methods for studying urban relations.

УДК 628.511

**С. М. ОРЛОВ, А. Я. ОРЛОВА**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

**ВЛИЯНИЕ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ЦИКЛОНА**

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 и характере электромагнитных процессов, протекающих в циклоне и торнадо. Существующая теория повышенной коагуляции пыли в циклонах объясняется частотой соударения и слипаемостью пыли. Сделано предположение, что пыль в циклоне, попадая в сильный вихревой поток, подвержена электризации. Имеющаяся электризация имеет хаотичное направление и влияет только на степень коагуляции пыли. Сделан вывод, что работа по изучению электростатических и электромагнитных процессов, протекающих в циклоне, имеет большой практический интерес, так как возможно позволит вместо хаотичного направления вектора напряженности электростатического поля придать ему направленный характер и тем самым значительно повысить степень сепарации пыли в циклонах без применения внешних источников электрического поля.

**циклон, торнадо, статическое электричество, электромагнитное поле**

В связи с огромными объемами очищаемых газов в промышленности, а также удорожанием энергоносителей и повышением в перспективе доли использования угля в мировом топливно-энергетическом балансе вопросы экономики очистки газов становятся чрезвычайно актуальными.

Циклоны являются наиболее характерными представителями сухих инерционных пылеуловителей. Существует множество схем обеспыливания газов в зависимости от источника пылеобразования, где циклоны применяются в качестве первой ступени очистки [1, 2, 3, 4]. Аппараты второй ступени рассчитываются на весь объем газа, подлежащего очистке. Аппараты второй ступени (рукавные, электрофильтры и др.) требуют больших капитальных и эксплуатационных затрат.

В предыдущих работах автора [5, 6, 7, 8] рассматривались вопросы по усовершенствованию существующих циклонов касательно вопроса снижения энергетических затрат при многоступенчатых схемах очистки газа от пыли.

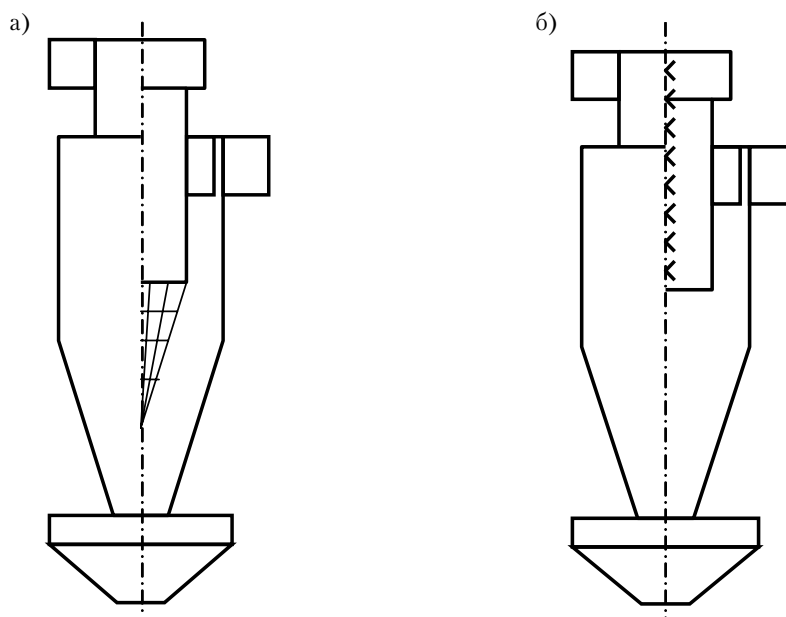
Используются два подхода повышения эффективности циклонов: это – разработка новых конструкций циклонов и усовершенствование существующих конструкций путем различных дополнений.

В настоящее время большое развитие получает способ сочетания различных механизмов осаждения или улавливания пыли в комбинированном аппарате.

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

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

Различают два вида электроциклонов по месту расположения электрической части. В некоторых конструкциях коронирующие электроды размещены в цилиндрической части циклона (рис. 1, а), а в аппаратах второго типа коронирующие электроды размещены в выхлопной трубе (рис. 1, б).



**Рисунок 1** – Схема центробежных электрофильтров: а) коронирующие электроды в цилиндрической части циклона; б) коронирующие электроды в выхлопной трубе.

Анализ работ, посвященных центробежным электрофильтрам, позволяет сделать вывод о том, что более предпочтительным являются электрофильтры второго типа [9].

Но, несмотря на существенные преимущества электроциклонов по сравнению с циклонами, электроциклоны широкого распространения не получили. В работе [7] показано, что при малом радиусе нахождения частицы в межэлектродном пространстве преобладает кулоновская сила, а по мере увеличения радиуса возрастает влияние центробежной силы. Это очень важно, поскольку в центре вихря полностью отсутствует центробежная сила, а разряжение максимальное, поэтому в циклонах наблюдается проскок даже очень крупных частиц пыли, попавших в центр вихря. Также роль кулоновской силы возрастает с уменьшением диаметра частицы. Так для частиц пыли менее 1 мкм кулоновская сила преобладает практически во всем межэлектродном пространстве, поэтому сепарация частиц пыли в выхлопной трубе циклона [5] без использования электрического поля будет затруднительна.

В работе [5] получена формула радиальной скорости частицы при совместном действии центробежных и кулоновских сил для наиболее неблагоприятного момента вхождения частицы пыли, равного  $0,3R_2$ :

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

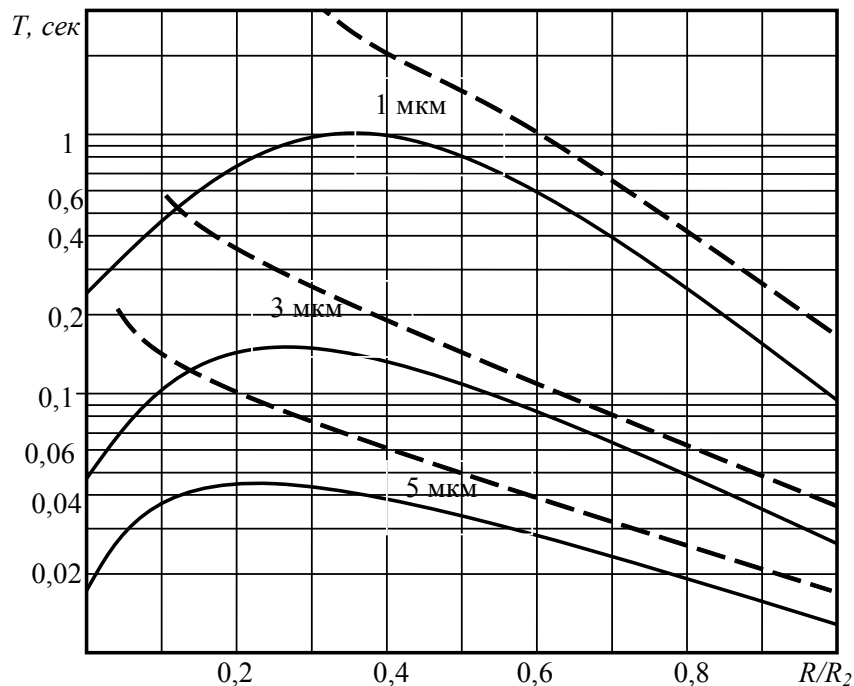
где  $R_2$  – внутренний радиус выхлопной трубы циклона.

Как видно из графиков (рис. 2), совместное действие кулоновских и центробежных сил значительно сокращает время нахождения частиц в межэлектродном пространстве, особенно это существенно при малом радиусе вхождения частицы в выхлопную трубу.

В настоящей статье будет рассмотрен вопрос повышенной коагуляции пыли в циклонах. Существующая теория объясняет это явление за счет соударения частиц пыли и степени слипаемости. Такое объяснение, на наш взгляд, не полностью отражает существующий процесс. Частицы пыли, попадая в циклон в мощный вихревой поток и взаимодействуя с молекулами газа и стенок циклона, получают достаточно сильный статический заряд, который играет не последнюю роль в процессе коагуляции.

Основные причины появления статического электричества:

- контакт между двумя материалами и их отделение друг от друга (включая трение, намотку, размотку и пр.);
- быстрый температурный перепад (например, в момент помещения материала в духовой шкаф);



**Рисунок 2** – Графики время нахождения частиц в межэлектродном пространстве при действии только центробежных сил ----- и совместного действия центробежных и кулоновских сил — при  $R_2 = 0,12$  м.

– радиация с высокими значениями энергии, ультрафиолетовое излучение, рентгеновские X-лучи, сильные электрические поля;

– резательные операции (например, на раскроечных станках или бумагорезальных машинах).

Поверхностный контакт и разделение материалов, возможно, являются наиболее распространенными причинами возникновения статического электричества.

Можно теоретически рассчитать вероятность возникновения статического электричества, для этого используется **трибоэлектрическая шкала**. Чем выше располагается материал на шкале, тем сильнее он заряжается. В верхней части шкалы располагаются материалы с положительными зарядами, а в нижней – с отрицательными. Действует и другая закономерность, чем больше разнесены между собой материалы, тем более мощным станет заряд.

Для примера рассмотрим обыкновенные грозовые облака. Эти природные электрические машины, как оказалось, способны накапливать потенциалы в миллиарды вольт, а общая мощность средней грозы вполне сравнима со взрывом нескольких термоядерных бомб. И все это – результат всего лишь взаимодействия капелек и льдинок, которые держатся в воздухе на восходящих потоках. Часто грозовые облака сопровождаются торнадо. При прохождении торнадо зажигаются выключенные лампочки накаливания, что свидетельствует о наличии в нем сильного переменного магнитного поля. А трубчатая структура торнадо позволяет предположить, что торнадо – это одиночный электрический разряд. Можно предположить, что молния и торнадо обладают одной природой и представляют собой проявления атмосферного электричества. Ко всему прочему – это еще и своеобразный электростатический генератор [10]. При достижении напряжения пробоя происходят разряды молний, очевидно, это и есть те самые молнии, описанные наблюдателями сумевшими заглянуть в «хобот» торнадо снизу. Кстати, это же отмечают пилоты самолетов, пролетающих над «оком» торнадо сверху. То, что торнадо – грандиозная электрическая машина, подтверждают и эти фото (рис. 3).

Данные фото наглядно демонстрируют, что торнадо и молния – явления одного порядка. Скажем даже так: торнадо – это «замедленная молния». Делается предположение, что торнадо являются как бы каналами передачи электрической энергии между грозовым облаком и землей. Когда статические потенциалы между облаком и землей уравниваются – торнадо гаснут.

Гидравлические процессы в циклоне и торнадо очень схожи [8]. Различие только в масштабах. Электрические процессы в торнадо также аналогичны электрическим процессам в циклонах. Различие состоит, как и в первом случае, в масштабах процесса и ограничении заряженных частиц пыли в

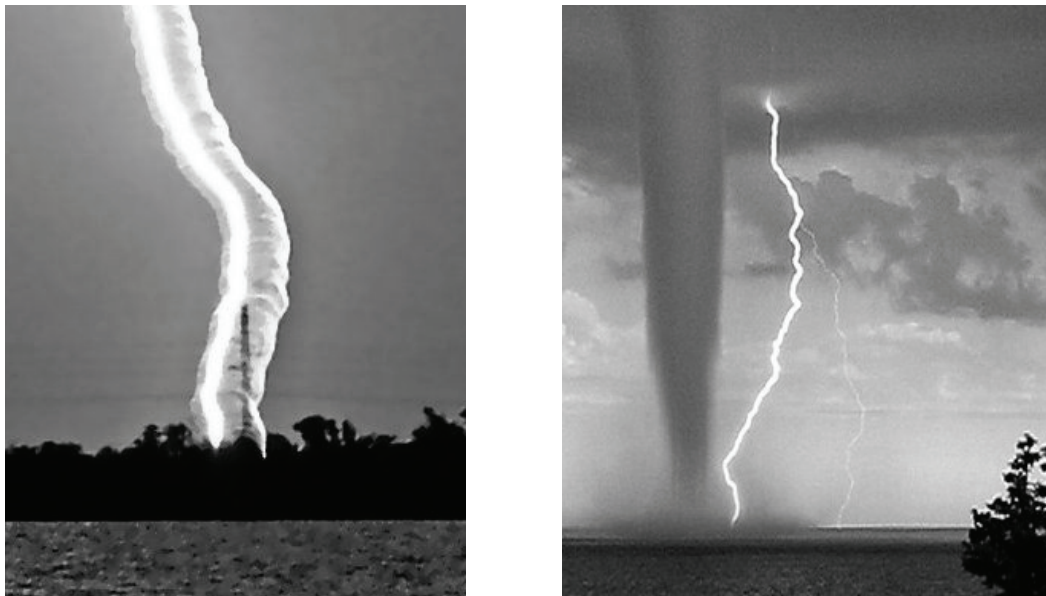


Рисунок 3 – Фотографии грозовых разрядов в торнадо.

вихревом потоке заземленными металлическими стенками циклона и отсутствии сильно электризованного материнского облака, поэтому электрические процессы в циклоне необходимо рассматривать как движение заряженных частиц в вихре.

Проанализируем характер статического заряда пыли в циклоне. При соприкосновении пылинок друг с другом они обмениваются электронами, получая разноименный заряд. При соприкосновении пылинки со стенок циклона, она получает отрицательный заряд, и при взаимодействии пылинок с молекулами газа пылинки могут получать как положительный, так и отрицательный заряд – это зависит от химических составов газа и пыли в соответствии с **трибоэлектрической шкалой**.

В настоящее время отсутствует какая-либо теория плазменно-электромагнитного состояния пылевого коктейля внутри циклона. Имеется плазменно-электромагнитная теория торнадо (смерча) [10, 11]. При расчете магнитных полей учитывались не только токи проводимости, но и конвективный ток вращающихся капель. Это связано с отсутствием азимутального тока проводимости вследствие цилиндрической симметрии плазменного столба.

Уравнения для магнитных полей имеют вид:

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

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

$$B_r = 0,$$

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

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

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

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

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

где  $B_0$  – вертикальная компонента геомагнитного поля. В выражении для азимутальной (вращающей) силы учитывалось и магнитное поле капельного соленоида. По этим формулам проводился анализ радиальных и осевых зависимостей азимутального магнитного поля и сил в плазме вихря под облачными зарядами на различных относительных высотах (рис. 4–7).

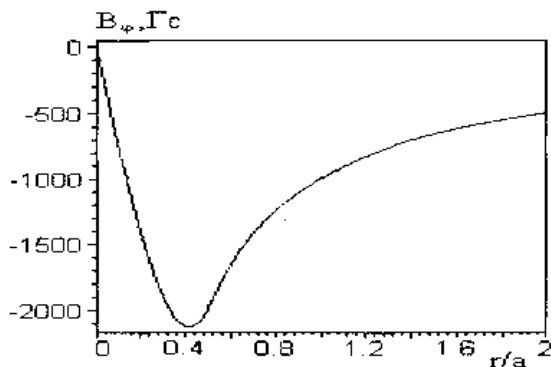


Рисунок 4 – Азимутальное магнитное поле на поверхности земли ( $h/a = 0.5$ ,  $Q = -64.2$  Кл,  $a = 1$  км).

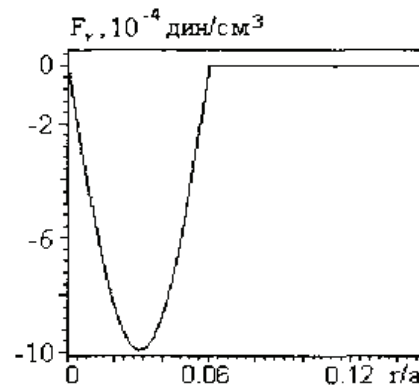
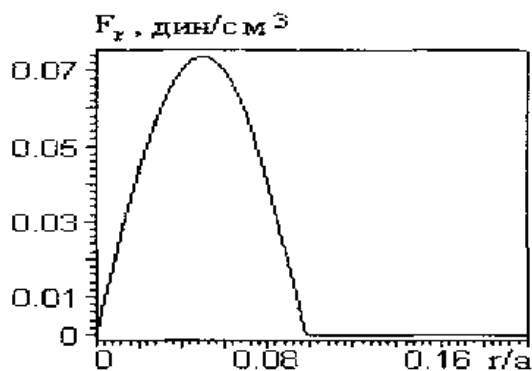


Рисунок 5 – Плотность радиальной силы в нижнем основании вихря ( $h/a = 1.3$ ,  $Q = -103.3$  Кл,  $a = 1$  км).

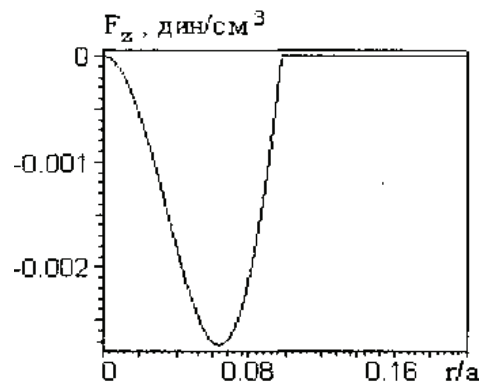
Видно, что радиальная сила здесь отрицательна, т. е. она сжимает плазму, как в z-пинче. Это говорит о том, что в генерации азимутального магнитного поля основную роль играет осевой ток. С уменьшением относительной высоты заряда становится существенной неоднородность радиального тока по высоте. Радиальная сила при этом может изменить свой знак и приводить не к сжатию плазмы, а к разрежению в ней (рис. 6).

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

Полученная теория [10, 11] мало пригодна для описания электромагнитных процессов в циклоне. Помимо масштабов процесса, вихрь в циклоне ограничен металлическими стенками, отсутствует материнское облако с большим статическим зарядом, вместо земной поверхности имеется пылесборный бункер, однако как методика вполне может пригодиться. В конечном итоге нам нужно установить уровень статического заряда по сечению циклона. Определить градиент направленности электрического поля и, самое главное, изыскать возможность вместо хаотично направленного вектора напряженности электростатического поля придать ему направленный характер.



**Рисунок 6** – Плотность радиальной силы в нижнем основании вихря ( $h/a = 0,5$ ,  $Q = -63,3$  Кл,  $a = 1$  км).



**Рисунок 7** – Плотность осевой силы в нижнем основании вихря ( $h/a = 0,5$ ,  $Q = -63,3$  Кл,  $a = 1$  км).

### ВЫВОДЫ

1. Сделано предположение, что пыль в циклоне, попадая в сильный вихревой поток, подвержена электризации.
2. Имеющаяся электризация имеет хаотичное направление и влияет только на степень коагуляции пыли.
3. Установлено, что работа по изучению электростатических и электромагнитных процессов, протекающих в циклоне, имеет большой практический интерес, так как возможно позволит вместо хаотичного направления вектора напряженности электростатического поля придать ему направленный характер и тем самым значительно повысить степень сепарации пыли в циклонах без применения внешних источников электрического поля.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пылеулавливание в металлургии [Текст] / Под ред. А. А. Гурвица. – М. : Металлургия, 1984. – 336 с.
2. Луговский, С. И. Совершенствование систем промышленной вентиляции [Текст] / С. И. Луговский, Г. К. Дымчук. – М. : Стройиздат, 1991. – 136 с.
3. Справочник по пыле- и золоулавливанию [Текст] / Под ред. А. А. Русанова. – М. : Энергия, 1975. – 296 с.
4. Алиев, Г. М. Устройство и обслуживание газоочистных и пылеулавливающих установок [Текст] / Г. М. Алиев. – М. : Металлургия, 1988. – 368 с.
5. Орлов, С. М. Исследование усовершенствованного циклона как первой ступени очистки газа от пыли [Текст] / С. М. Орлов, Э. И. Дмитроченкова // Вісті автомобільно-дорожнього інституту. – 2011. – № 1. – С. 188–195.
6. Дмитроченкова, Э. И. Теоретический анализ комбинированного циклона [Текст] / Э. И. Дмитроченкова, С. М. Орлов // Науковий вісник будівництва. – 2013. – № 72. – С. 431–440.
7. Орлов, С. М. Исследование комбинированного циклона с прямоточными элементами [Текст] / С. М. Орлов, В. И. Захаров, А. Я. Орлова // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2011. – Том 7, № 2. – С. 83–91.
8. Орлов, С. М. Исследование целесообразности применения циклонов «правого» и «левого» направления вращения в северном полушарии Земли [Текст] / С. М. Орлов, А. Я. Орлова // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2014. – Вып. 2014-5(109) : Инженерные системы и техногенная безопасность. – С. 29–35.
9. Куцев, Л. А. Интенсификация процессов улавливания твердой и жидкой фазы аэрозолей при использовании силовых полей [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Л. А. Куцев. – Белгород, 2004. – 41 с.
10. Боев, А. Г. Электромагнитная теория смерча. I ч. Электродинамика вихря [Текст] / А. Г. Боев // Радиофизика и радиоастрономия. – 2009. – Т. 14, № 2. – С. 121–149.
11. Боев, А. Г. Плазменная теория смерча [Текст] / А. Г. Боев // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения (6). – 2008. – № 4. – С. 133–138.

Получено 07.09.2015

С. М. ОРЛОВ, А. Я. ОРЛОВА

## ВПЛИВ СТАТИЧНОЇ ЕЛЕКТРИКИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ЦИКЛОНУ

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. Існуюча теорія підвищеної коагуляції пилу в циклонах пояснюється частотою зіткнення і злипністю пилу. Зроблено припущення, що пил в циклоні, потрапляючи в сильний вихровий потік схильний до електризації. Наявна електризація має хаотичний напрямок і впливає тільки на ступінь коагуляції пилу. Зроблено висновок, що робота по вивченню електростатичних і електромагнітних процесів, що протікають в циклоні, має великий практичний інтерес, оскільки можливо дозволить замість хаотичного напрямку вектора напруженості електростатичного поля надати йому спрямований характер і тим самим значно підвищити ступінь сепарації пилу в циклонах без застосування зовнішніх джерел електричного поля.

**циклон, торнадо, статична електрика, електромагнітне поле**

STANISLAV ORLOV, ALLA ORLOVA

## THE EFFECT OF STATIC ELECTRICITY ON THE EFFICIENCY OF THE CYCLONE

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 found out, that many processes in the cyclone and tornado are similar. There are the major difference in the scales of event and in the level and nature of electromagnetic process, which are in the cyclone and tornado. The existing theory of increased coagulation of dust in cyclones due to the frequency of collision and stickiness of dust. The assumption is made that the dust in the cyclone, falling into a strong vortex flow is exposed to the electrification. Existing electrification is chaotic in direction and is influenced only by the degree of coagulation of dust. It is concluded that work on the study of electrostatic and electromagnetic processes occurring in the cyclone is of great practical interest, since it is possible will is the chaotic direction of the vector electrostatic field to impart a directional character, and thus significantly increase the degree of dust separation in cyclones without the use of external sources of electric field.

**cyclone, tornado, static electricity, electromagnetic field**

**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** – Ph.D. (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 628.16

**А. Я. НАЙМАНОВ, Г. С. ТУРЧИНА**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## **НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ ПОДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ КАК СОВОКУПНОСТЬ КОНСТРУКТИВНОЙ И ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ**

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

**надежность, вероятность безотказной работы, коэффициент готовности, кольцевая водопроводная сеть**

Надежность действующей водопроводной сети определяется двумя компонентами: конструктивной надежностью и эксплуатационной.

Конструктивную надежность можно рассчитать с помощью метода эквивалентирования и декомпозиции (на основании составленной структурно-логической схемы) или с применением математической логики (например, рассматривая систему водоснабжения как систему смежных мостиковых систем с помощью метода кратчайшего пути или минимального сечения). Каждый из методов имеет свои плюсы и минусы, и все же один недостаток объединяет все эти способы – это отсутствие учета неравнозначности различных участков одной и той же сети. Частично эта проблема решается, например, при расчете с помощью так называемой булевой алгебры. Тогда, при способе расчета минимальными сечениями, возможен учет важности местоположения одного участка в сравнении с другими. Частично эта же методика нашла свое отображение при расчете системы, сведенной к схеме с последовательно-параллельными элементами. Однако ни в одном из приведенных способов не ведется учет неравнозначности участков в связи с проходящим через их сечение количеством воды [2–5].

А. А. Ионин предложил значимость участка сети оценивать по величине относительного (нормализованного) расхода  $q_{in}$  [6]

$$q_{in} = \frac{q_i}{Q},$$

где  $q_i$  – расчетный расход воды на участках сети, л/с;  
 $Q$  – общий расход воды, подаваемой в сеть.

На наш взгляд, более объективным показателем роли участка следует считать величину относительного сечения труб на участке сети  $C_i$

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

где  $d_i$  и  $f_i$  – диаметр и площадь сечения труб на участке;  
 $D$  и  $F$  – условный диаметр и площадь сечения трубопровода для пропускания всего подаваемого в сеть расхода воды  $Q$  при скорости течения  $V = 1$  м/с.

Сумма величин  $C_i$  всех участков кольцевой сети в какой-то мере может служить показателем рациональности устройства сети. В самом деле, чем больше эта сумма, тем больше затрачено труб для подачи воды. Учтем, что  $\sum C_i$  обычно изменяется от 1 (для тупиковой сети в одну линию) до 4 (для однокольцевой сети, все участки которой должны иметь диаметр  $D$  из условия надежности). Такая изменчивость делает данный параметр не вполне удобным. Удобнее значимость участка  $Z_i$  оценивать по величине отношения

$$Z_i = \frac{C_i}{\sum C_i}.$$

Данная величина может изменяться от 0 до 1. Чем выше значимость участка, тем сильнее его отказ влияет на надежность сети.

Приведем пример расчета надежности системы подачи и распределения воды из различных материалов, схема сети приведена на рис. 1.

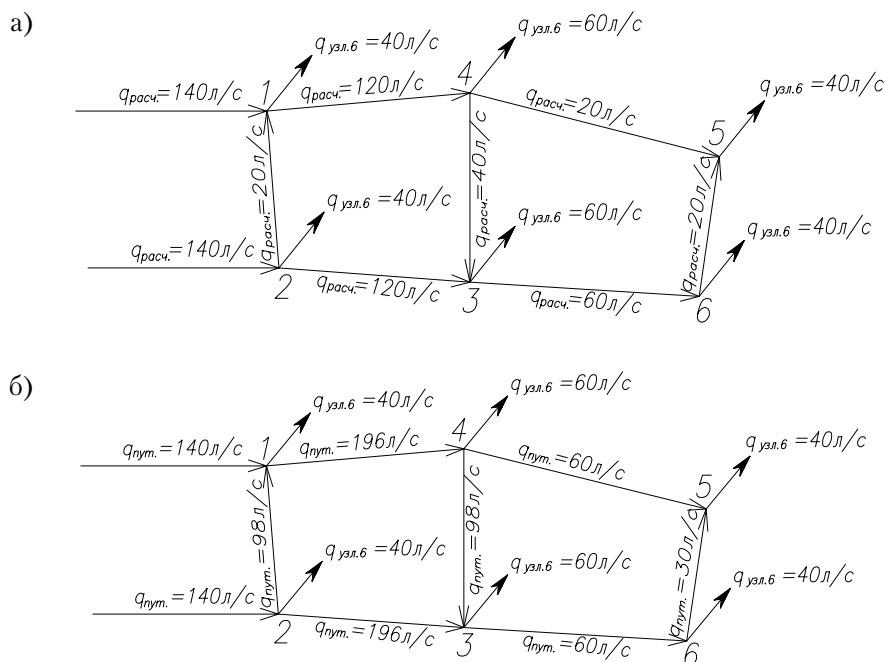


Рисунок 1 – Схема условной водопроводной сети: а) с расчетными расходами; б) с путевыми расходами.

За отказ сети может приниматься снижение расхода воды более, чем на 30 % согласно требованиям СНиП 2.04.02-84 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения» и ДБН В.2.5-74:2013 «Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди». Кстати, это же требование может быть использовано и для назначения диаметров труб на участках, выходящих из любого узла сети. При аварии на любом из выходящих из узла участков общий расход воды, отводимый из узла, должен быть не менее 70 % расчетного значения. На практике это значит, что при двух выходящих участках диаметр каждого из них должен быть назначен по 70%-м суммарного расчетного воды на этих участках. В связи с этим диаметр трубопровода подбирается не по расчетному, а по приведенному расходу (табл. 1). Согласно этому условию, диаметры участков 1–4 и 2–3, например, составят

$$q_{пр.1-4} = 0,7 \cdot (140 + 140) = 196 \text{ л/с},$$

а диаметр участка 1–2

$$q_{пр.1-2} = 0,7 \cdot (120 + 20) = 98 \text{ л/с}.$$

**Таблица 1** – Расчетные показатели сети по приведенному расходу ( $\lambda_{\text{стали}} = 0,32$  1/год·км;  $\lambda_{\text{пластика}} = 0,02$  1/год·км;  $\lambda_{\text{сер.чугуна}} = 0,36$  1/год·км,  $\mu_i = 219$  1/год).

№ уч-ка	Длина уч-ка, км	Расход воды, л/с		Материал трубопровода								
				Полиэтилен			Сталь			Чугун		
		Расчетный	Приведенный	$d$ , мм	$\lambda_i \cdot l_i$ , 1/год·км	$\mu_i$ , 1/год	$d$ , мм	$\lambda_i \cdot l_i$ , 1/год·км	$\mu_i$ , 1/год	$d$ , мм	$\lambda_i \cdot l_i$ , 1/год·км	$\mu_i$ , 1/год
1–2	0,50	20	98	355	0,010	219	300	0,16	219	300	0,032	219
2–3	0,75	120	196	450	0,015	219	450	0,24	219	400	0,024	219
3–4	0,60	40	98	355	0,012	219	300	0,192	219	300	0,03	219
4–1	0,80	120	196	450	0,016	219	450	0,256	219	400	0,02	219
4–5	1,00	20	60	280	0,020	219	250	0,32	219	250	0,04	219
5–6	0,45	20	30	225	0,009	219	200	0,144	219	200	0,018	219
3–6	0,90	60	60	280	0,018	219	250	0,288	219	250	0,036	219
Всего	$\sum l_i = 5$	400	934		0,1			1,6			0,2	

В структурно-логической схеме кольцевой сети все участки могут быть показаны как параллельно соединенные элементы. Это связано с тем, что отказ одного участка не ведет к отказу других участков. Параметры надежности каждого участка могут быть легко вычислены по известным формулам [2]

- количество отказов участка  $n_i = \lambda_i t$ ;
- общее количество отказов в сети  $N = \sum n_i$ ;
- вероятность безотказной работы  $P_i = e^{-\lambda_i t}$ , с учетом Z:

$$P_{(iZ)} = e^{-\lambda_i t Z_i}; \quad (1)$$

- вероятность отказа  $Q_i = 1 - P_i$ ;
- коэффициент готовности  $K_{Z_i} = \frac{\mu}{\mu + \lambda_i}$  с учетом Z:

$$K_{Z_i} = \frac{\mu}{\mu + \lambda_i Z_i},$$

где  $\lambda$  – интенсивность отказов, 1/год·км, зависит  $\lambda$  от материала труб;  
 $l_i$  – длина участка, км;  
 $t$  – время эксплуатации, для новых трубопроводов принимается  $t = 1$  год;  
 $\mu$  – интенсивность восстановления, 1/год.

Дальнейший процесс оценки надежности сети можно вести несколькими путями. Одним из таких путей является расчет системы с параллельным соединением всех участков сети в структурно-логической схеме. В таком случае определение параметров надежности сети ( $P$  и  $K_r$ ) происходит по известным формулам для систем с параллельным соединением элементов при постоянном резервировании. При этом, однако же, не учитывается неодинаковая значимость участков (рис. 2).

Логично предположить, что каждый участок влияет на общую интенсивность отказов в соответствии со своей значимостью. Тогда  $\lambda_{\text{сети}} = \sum (\lambda_i \cdot Z_i)$ .

Далее вычисляется вероятность безотказной работы

$$P_{\text{сети}} = e^{-\lambda_{\text{сети}} t}.$$

Коэффициент готовности сети (с учетом того, что  $\mu_{\text{сети}} = r\mu$ ) составит:

$$K_{Z(\text{сети})} = \frac{r\mu}{r\mu + \lambda_{\text{сети}}},$$

где  $r$  – количество ремонтных бригад.

Средняя наработка сети на отказ и среднее время восстановления

$$T_{o(\text{сети})} = \frac{1}{\lambda_{\text{сети}}}, \quad T_{\text{с}} = \frac{1}{r\mu}.$$

Тогда найденные показатели надежности для данной системы будут иметь результаты, представленные в таблицах 2, 3 и 4.

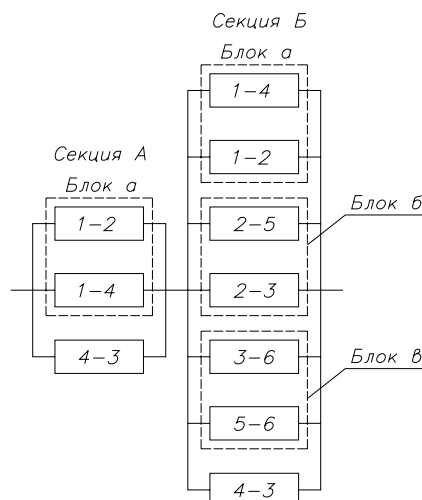


Рисунок 2 – Структурно-логическая схема расчетной двухкольцевой сети водоснабжения.

Таблица 2 – Расчет показателей надежности для труб из полиэтилена

№ уч-ка	$C_i = \left(\frac{d_i}{D}\right)^2$	$Z_i = \frac{C_i}{\sum C_i}$	$\lambda_i \cdot l_i$	$\lambda_i \cdot l_i \cdot Z_i$	$P_i = e^{-\lambda_i l_i}$	$P_{iz} = e^{-\lambda_i l_i Z_i}$	$Kz_{(i)} = \frac{\mu}{\mu + \lambda l_i}$	$Kz_{(iz)} = \frac{\mu}{\mu + \lambda l_i Z_i}$
1-2	0,350	0,146	0,16	0,0015	0,990051	0,99854	0,999954	0,999984
2-3	0,563	0,234	0,24	0,0035	0,985113	0,99651	0,999932	0,999992
3-4	0,350	0,146	0,192	0,0018	0,988073	0,99825	0,999945	0,999983
4-1	0,563	0,234	0,256	0,0037	0,984129	0,99628	0,999927	0,999992
4-5	0,218	0,091	0,32	0,0018	0,980201	0,99818	0,999909	0,999998
5-6	0,141	0,058	0,144	0,0005	0,991041	0,99946	0,999959	0,999993
3-6	0,218	0,091	0,288	0,0016	0,982163	0,99836	0,999918	0,999984
Всего	2,403	1	1,6	0,0144	0,904847	0,985665	0,999544	0,999934

Таблица 3 – Расчет показателей надежности для труб из стали

№ уч-ка	$C_i = \left(\frac{d_i}{D}\right)^2$	$Z_i = \frac{C_i}{\sum C_i}$	$\lambda_i \cdot l_i$	$\lambda_i \cdot l_i \cdot Z_i$	$P_i = e^{-\lambda_i l_i}$	$P_i = e^{-\lambda_i l_i Z_i}$	$Kz_{(i)} = \frac{\mu}{\mu + \lambda l_i}$	$Kz_{(i)} = \frac{\mu}{\mu + \lambda l_i Z_i}$
1-2	0,003	0,13	0,16	0,0208	0,853064	0,979552	0,999270	0,999905
2-3	0,006	0,261	0,24	0,0626	0,787903	0,939679	0,998905	0,999714
3-4	0,003	0,13	0,192	0,025	0,826377	0,975513	0,999124	0,999886
4-1	0,006	0,261	0,256	0,0668	0,775480	0,935789	0,998832	0,999695
4-5	0,002	0,087	0,32	0,0278	0,727719	0,972727	0,998541	0,999873
5-6	0,001	0,044	0,144	0,0063	0,866730	0,993727	0,999343	0,999971
3-6	0,002	0,087	0,288	0,0251	0,751220	0,975420	0,998687	0,999886
Всего	0,023	1	1,6	0,2344	0,201930	0,687223	0,992747	0,998931

Для расчета системы водоснабжения как системы массового обслуживания (СМО), необходимо представить систему как граф.

В СМО выделяются следующие основные параметры:

- число «каналов обслуживания» ( $r$ ); в нашем случае понятие «канал обслуживания» объединяет ремонтную бригаду рабочих со всеми переданными ей механизмами и материалами, необходимыми для проведения ремонта;
- интенсивность обслуживания заявки на каждый канал (этот параметр обозначен через  $\lambda$  и равен величине, обратной времени ремонта от момента выключения участка до момента включения).
- интенсивность поступления заявок в систему, обозначенная через  $\lambda$ , равная величине, обратной средней продолжительности работы отдельного участка водопроводной сети до отказа) [1].

Таблица 4 – Расчет показателей надежности для труб из серого чугуна

№ уч-ка	$C_i = \left(\frac{d_i}{D}\right)^2$	$Z_i = \frac{C_i}{\sum C_i}$	$\lambda_i \cdot l_i$	$\lambda_i \cdot l_i \cdot Z_i$	$P_i = e^{-\lambda_i l_i}$	$P_i = e^{-\lambda_i l_i Z_i}$	$Kz_{(i)} = \frac{\mu}{\mu + \lambda l_i}$	$Kz_{(i)} = \frac{\mu}{\mu + \lambda l_i Z_i}$
1–2	0,250	0,135	0,032	0,0043	0,749784	0,961870	0,998687	0,999822
2–3	0,444	0,239	0,024	0,0057	0,805753	0,949691	0,999015	0,999764
3–4	0,250	0,135	0,03	0,0041	0,763401	0,964210	0,998769	0,999834
4–1	0,444	0,24	0,02	0,0048	0,835286	0,957724	0,999179	0,999803
4–5	0,174	0,095	0,04	0,0038	0,697702	0,966382	0,998359	0,999844
5–6	0,111	0,061	0,018	0,0011	0,850455	0,990168	0,999261	0,999955
3–6	0,174	0,095	0,036	0,0034	0,723275	0,969692	0,998523	0,999859
Всего	1,847	1	0,2	0,0272	0,165330	0,971313	0,769555	0,999867

Помимо этих параметров, эффективность СМО зависит от дисциплины обслуживания, т. е. порядка распределения заявок между ремонтными бригадами. Дисциплина обслуживания или, иными словами, организация выполнения работ по ликвидации аварии в разных производственных управлениях водопроводно-канализационных хозяйств (ПУВКХ) страны строится в зависимости от конкретных условий: размера обслуживаемого объекта, наличия механизмов, рабочей силы и т. д. и т. п. Как правило, при организации ремонтных работ, если заявки образуют очередь, обслуживание осуществляется с приоритетом: аварии на участках, работа которых сказывается на условиях водопотребления большого количества потребителей, ликвидируется в первую очередь. Постоянный граф состояний (рис. 2) предусматривает обслуживание заявки по мере ее поступления, число каналов обслуживания равно числу участков, т. е. очередь не образуется.

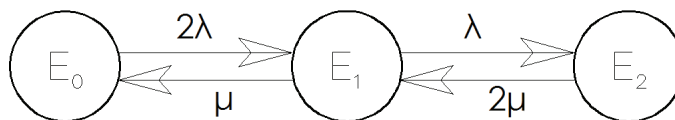


Рисунок 2 – Граф состояний для двух водоводов.

В реальных условиях  $r < n$  и возможно образование очереди. Для сети, имеющей  $n$  участков, которую обслуживает  $r$  ремонтных бригад (каналов обслуживания), размеченный граф состояний будет иметь вид, указанный на рис. 3, а формулы для определения  $P_k$  и  $P_0$ , полученные с помощью данного графа, примут следующие выражения [1]:

при  $1 < k < r$

$$P_k = \frac{(n-k+1)! \lambda^k}{r! \mu^k} \cdot P_0 = \frac{n!}{k!(n-k)!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k P_0,$$

при  $r < k < n$

$$P_k = \frac{(n-k+1)! \lambda^k}{r! r^{k-r} \mu^k} \cdot P_0 = \frac{n!}{k! r^{k-r} (n-k)!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k P_0, \quad (2)$$

$$P_0 = \left[ \sum_{k=0}^r \frac{n!}{k!(n-k)!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k + \sum_{k=r+1}^n \frac{n!}{r! r^{k-r} (n-k)!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \right]^{-1}. \quad (3)$$

Граф состояний (рис. 3) с точки зрения систем массового обслуживания можно представить в следующем виде:

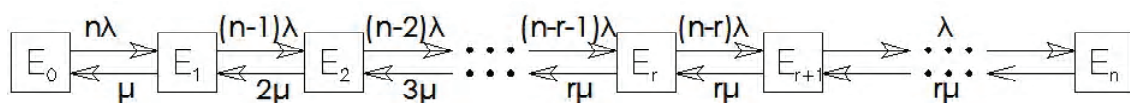


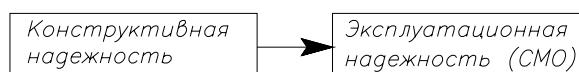
Рисунок 3 – Размеченный граф состояний водопроводной сети с обработкой заявок в порядке очереди, без учета значимости участков.

При этом видно, что переход к следующему состоянию системы происходит после отключения какого-либо участка, возвращение к данному состоянию происходит после восстановления его рабочего состояния. Однако при этом не учитывается, что при поступлении заявок в диспетчерскую рабочие бригады в первую очередь отправятся на ремонт участка с большим диаметром или имеющие большую значимость в сравнении с другими, ожидающими ремонта.

На примере расчетной схемы найдем параметры надежности системы водоснабжения как системы массового обслуживания. Расчет производится по формулам (2) и (3). Находим значения вероятности безотказной работы с учетом влияния коэффициента  $Z$  и без него. Для расчета с учетом значимости участка введем коэффициент значимости в формулу (1).

Затем произведем расчет системы водоснабжения согласно формулам (1) и (2).

Для любой инженерной системы (рис. 4) важны расчеты и конструктивной, и эксплуатационной надежности, поэтому при определении вероятности безотказной работы нужен учет обоих этих показателей. Соответственно, возможно представить эти два значения как элементы одной системы.



**Рисунок 4** – Схема функциональной зависимости двух видов надежности: конструктивной и эксплуатационной.

Тогда общая вероятность безотказной работы системы (табл. 5) составит произведение значений конструктивной и эксплуатационной надежности как двух последовательно соединенных элементов системы.

**Таблица 5** – Полученные результаты вероятностей безотказной работы системы

Вид рассчитываемой надежности		Материал трубопровода					
		Полиэтилен		Сталь		Чугун	
		k = 1	k = 2	k = 1	k = 2	k = 1	k = 2
Конструктивная надежность ( $P_{к.сети}$ )	Без учета $Z$	0,904847		0,201930		0,165330	
	С учетом $Z$	0,985665		0,687223		0,769555	
Эксплуатационная (СМО) надежность ( $P_{эк.сети}$ )	Без учета $Z$	0,999361	0,999999	0,989876	0,999911	0,988625	0,999888
	С учетом $Z$	0,999908	0,999999	0,998503	0,999998	0,998328	0,999997
Общая вероятность безотказной работы системы	Без учета $Z$	0,904269	0,904846	0,199886	0,201912	0,163449	0,165311
	С учетом $Z$	0,985574	0,985664	0,686194	0,687222	0,768268	0,769533

Таким образом, из расчетов видно, что значение финальной вероятности безотказной работы меньше значений  $P_{к.сети}$  и  $P_{эк.сети}$  в отдельности. Также наглядно продемонстрирована зависимость расчетных показателей эксплуатационной надежности от количества рассчитываемых отключенных участков. Естественно, чем большее количество участков в сети – тем в большей вероятности возможно одновременное отключение двух и более участков. Следовательно, с увеличением их количества расчет возможно проводить для трех и более отключенных трубопроводов. В качестве примера для расчетов были приняты трубы из полиэтилена, стали и чугуна, во всех этих случаях при применении коэффициента неравнозначности прослеживается увеличение расчетного показателя параметров надежности сети ( $P_{сети}$  и  $K_g$ ). Предложенная методика оценки надежности кольцевой сети подачи и распределения воды с учетом надежности участков может быть использована в практических целях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гальперин, Е. М. Расчет кольцевых водопроводных сетей с учетом надежности функционирования [Текст] / Е. М. Гальперин. – Саратов : Издательство Саратовского университета, 1989. – 104 с.
2. Особенности оценки надежности кольцевой сети водопроводной сети [Текст] / А. Я. Найманов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2006. – № 12. – С. 11–16.
3. Рябинин, И. А. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем [Текст] / И. А. Рябинин, Г. Н. Черкесов. – М. : Радио и связь, 1981. – 264 с. : ил. – (Б-ка инженера по надежности).
4. Левин, В. И. Логическая теория надежности сложных систем [Текст] / В. И. Левин. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 128 с. – (Надежность и качество).

5. Круценюк, И. Ю. Математические методы и модели оценки вероятности безотказной работы сети водоснабжения на примере г. Норильска [Текст] : дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук : спец. 05.13.18. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ / И. Ю. Круценюк. – Норильск, 2005. – 193 с.
6. Ионин, А. А. Надежность систем тепловых сетей [Текст] / А. А. Ионин. – Москва : Стройиздат, 1989. – 265 с. : ил. – (НК: Надежность и качество).

Получено 08.09.2015

А. Я. НАЙМАНОВ, Г. С. ТУРЧИНА  
НАДІЙНІСТЬ СИСТЕМ ПОДАЧІ ТА РОЗПОДІЛУ ВОДИ ЯК СУКУПНІСТЬ  
КОНСТРУКТИВНОЇ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ  
Донбаська національна академія будівництва і архітектури

Стаття присвячена проблемі врахування нерівнозначності різних ділянок трубопроводу у кільцевій системі подачі та розподілу води, при розрахунку конструктивної та експлуатаційної надійності. Запропонована методика знаходження показників надійності безвідмовної роботи та коефіцієнта готовності з урахуванням впливу запропонованого коефіцієнта значущості ділянок.  
**надійність, вірогідність безвідмовної роботи, коефіцієнт готовності, кільцева водопровідна мережа**

AUBEKIR NAIMANOV, GALINA TURCHINA  
RELIABILITY OF THE SYSTEM OF THE SERVE AND DISTRIBUTING OF  
WATER AS THE AGGREGATE OF STRUCTURAL AND EXPLOITATION  
RELIABILITY  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

The article is devoted to the problem of account of unaccounted in equivalence of different sections of the pipelines in the annular system of the serve and distributing of water, at the calculation of structural and exploitation reliability. The method of finding of indexes of faultless work and coefficient of readiness is offered, taking into account influencing of coefficient of meaningfulness of sections.  
**reliability, probability of faultless work, coefficient of readiness, annular plumbing network**

**Найманов Аубекір Ягопирович** – доктор технічних наук, професор; професор кафедри міського будівництва та господарства Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: водопостачання, очищення води, методи підвищення надійності мереж водопостачання та каналізації.

**Турчина Галина Сергіївна** – магістр; старший лаборант кафедри охорони праці, безпеки життєдіяльності та цивільного захисту Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: надійність мереж водопостачання.

**Найманов Аубекір Ягопирович** – доктор технических наук, профессор; профессор кафедры городского строительства и хозяйства Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: водоснабжение, очистка воды, методы повышения надежности сетей водоснабжения и канализации.

**Турчина Галина Сергеевна** – магистр; старший лаборант кафедры охраны труда, безопасности жизнедеятельности и гражданской защиты Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: надежность сетей водоснабжения.

**Naimanov Aubekir** – D.Sc. (Eng.), Professor, City Construction and Economy Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: water supply, water purification, methods of increasing reliability of water supply and sewer nets.

**Turchina Galina** – Master, senior laboratory assistant, Occupational Safety and Health, Safety of Leaving and Civil Defense Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: reliability of water supply nets.

УДК 620.91(477)+797.34(477)

**Д. В. ВЫБОРНОВ, С. И. МОНАХ**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## **ЭКОНОМИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТНУ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ТЕПЛОТУ ШАХТНЫХ ВОД**

Выполнен анализ работы парокомпрессионной теплонасосной установки (ТНУ), использующей теплоту шахтной воды для нужд теплоснабжения с экономической и экологической точки зрения. Произведены расчеты на примере шахты в г. Дзержинск.

**теплонасосная установка, инвестиции, окупаемость, тепловая мощность, экономический эффект**

### **ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Из-за тенденции неизменного удорожания первичных топливно-энергетических ресурсов вопрос преобразования низкопотенциальной теплоты шахтных и других сбросных вод в высокопотенциальную, которая может быть утилизирована с помощью специальных установок – тепловых насосов – становится очень актуальным. Совершенно очевидна перспективность ТН, использующих бросовую теплоту промышленных предприятий, которые так или иначе в процессе своей деятельности производят низкопотенциальные источники теплоты, с чем и связана проблематика данной статьи.

### **ЦЕЛЬ СТАТЬИ И ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Работа посвящена экологической и экономической оценке эффективности термодинамического цикла ТНУ, использующей теплоту шахтной воды для нужд теплоснабжения.

### **ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА**

По результатам проведенных численных и практических экспериментов [1...9] была доказана целесообразность использования сбросных шахтных вод (как и других промышленных стоков со сходным составом и теплофизическими характеристиками) в качестве низкопотенциального источника теплоты для ТНУ, работающих по парокомпрессионному циклу. Следовательно, стало необходимым выполнить технико-экономическое обоснование эксплуатации ТНУ, использующей теплоту шахтных вод.

Очевидно, что при использовании ТНУ для индивидуального теплоснабжения будут иметь место следующие преимущества:

- ТНУ являются установками индивидуального теплоснабжения без использования развитых тепловых сетей и теплопотерями на участках транспортировки теплоносителя к потребителю;
- происходит снижение объема первичных энергоресурсов, расходуемых на теплогенерацию для нужд теплоснабжения;
- отмечается улучшение экологической обстановки в населенных пунктах, т. к. выработка теплоты, сопровождающаяся выбросами в приземный слой атмосферы, заменяется выработкой электроэнергии, которая осуществляется за пределами населенных пунктов;
- безопасность при эксплуатации по сравнению с котельными на газообразном топливе;
- малые затраты на эксплуатационное обслуживание, т. к. ТНУ как малой, так и большой мощности не требуют постоянного присутствия обслуживающего персонала [10].

Однако при использовании ТН есть два недостатка: высокая стоимость капитальных затрат на устанавливаемое оборудование и сравнительная дешевизна первичных топливных энергоресурсов.



Кроме прочего, эффективность применения ТН повышается при незначительном повышении теплового потенциала, при постоянной тепловой нагрузке и температурах теплоносителей; при низкой стоимости электроэнергии по сравнению с топливом.

В данном разделе производится анализ экономической эффективности работы ТНУ, использующей в качестве первичного теплоносителя теплоту шахтных вод, а также других низкопотенциальных стоков, работающих в системе отопления по бивалентной схеме с пиковым догревателем. Целью данного анализа будет определение экономической эффективности реального проекта реконструкции котельной с установкой ТНУ, использующей теплоту шахтной воды, которая была подобрана с использованием расчетов и алгоритмов, предложенных выше. В качестве пикового догревателя предложена котельная на газообразном топливе. В результате получены экономические характеристики данного проекта и выведены приблизительные удельные показатели, которые станут возможным использовать для последующих экономических оценок и проектирования в этой сфере. Также доказана экологическая эффективность конкретной установки путем расчета предотвращенного выброса.

Основным экономическим показателем эффективности инвестиций является полная (суммарная) дополнительная прибыль, которая может быть получена за срок службы (эксплуатации) энергосберегающих мероприятий. В зависимости от того, каким образом используются потоки будущих прибылей, их или дисконтируют, т. е. определенным образом снижают для объективного сопоставления с величиной инвестиций на момент их реализации или, изымая из денежного обращения, наращивают (капитализируют). Если промежуточные доходы дисконтируются, то соответствующую величину суммарной дополнительной прибыли обозначают как полный дисконтированный доход; если промежуточные прибыли наращиваются (капитализируются), то соответствующую величину суммарной дополнительной прибыли обозначают как полный наращенный доход.

Первой стадией оценки проекта является проведение энергоаудита. В данном случае на этом этапе оценивается тепловой потенциал сбросных шахтных вод (либо других промышленных сточных вод), а именно, температура, расход, загрязненность шахтных вод, их химический состав. На следующем этапе производится оценка объектов инфраструктуры и жилищно-коммунального фонда с целью выявления наиболее убыточной с теплофизической точки зрения сферы предоставления теплоснабжения. Далее следует предварительный расчет возможных вариантов утилизации теплоты шахтных вод (выбор схем ТНУ, типа ХА, модели ТН, способов подачи шахтной воды к установке и пр.). Из предоставленных вариантов технического расчета выбирается наиболее целесообразный, после чего производится технико-экономическое сравнение предлагаемого варианта с инвестициями средств в реконструкцию ТГУ в «традиционном» понимании смысла этого слова, т. е. с применением более нового котельного оборудования, с более высоким КПД. В данном случае производится технико-экономическое сравнение ТНУ «Mayekawa» котлов типа КСВа-1,25 отечественного производства в комплекте с горелками Riello, работающими на газообразном топливе.

Далее рассмотрим оценку инвестиций на примере реконструкции котельной в г. Дзержинск. Проектом предусматривается реконструкция котельной квартала 165 г. Дзержинска с внедрением тепловых насосов и вспомогательного оборудования для нужд теплоснабжения. В качестве потребителей котельной выступают 22 жилых дома, 1 детский сад, 1 школа, дом культуры. В качестве источника низкопотенциальной теплоты используются сбросные воды шахты «Северная» с температурой воды 22...26 °С. Расход шахтных вод, подаваемых на ТНУ, составляет 120 м<sup>3</sup>/час. Расстояние от котельной до помещения здания на территории шахты «Северная», где планируется разместить теплонасосный комплекс – 750 м, поэтому эти два объекта планируется соединить трубопроводами из труб ППУ и обеспечить пиковым источником догрева теплоносителя. Для этого проектом предусмотрена установка в котельной котлов КСВа-1,25 в количестве 3 шт. Также проектом предусматривается установка ТНУ общей тепловой мощностью 3,4 МВт.

Прибыль, получаемая от реализации проекта, состоит в основном из средств, высвобождаемых при экономии энергоресурсов в процессе эксплуатации ТНУ, использующей теплоту шахтной воды.

Затраты на проект определяются следующими пунктами:

- капитальные затраты при строительстве ТНУ (помещение тепlopункта, необходимые накопительные резервуары, линии трубопроводов, изоляция, основное и вспомогательное оборудование и пр.);
- затраты на электроэнергию, потребляемую двигателями электрооборудования ТНУ и сопряженных с ней сетей;
- заработная плата обслуживающему персоналу с необходимыми отчислениями в социальные фонды;

- затраты на плановые и капитальные ремонты в процессе эксплуатации оборудования;
  - амортизационные отчисления;
  - затраты на эксплуатацию ТГУ в случае необходимости покрытия пиковой нагрузки.
- Основные технико-экономические показатели приведены в таблице 1.

**Таблица 1** – Техничко-экономические показатели при реконструкции источника теплоты, с внедрением ТНУ, использующей теплоту шахтных вод

Наименование показателей	Единица измерения	Показатели	
		до реконструкции	после реконструкции
Подключенная тепловая нагрузка на котельную	МВт	4,1	4,9
Установленная мощность котлов	МВт	6,4	5,0
Марки и КПД котлов		КВГМ-1,6 – 4 шт. КПД – 85 %	КСВа-1,25 – 4 шт. КПД – 92 %
Годовая потребность в тепле	ГДж/год	31 530	37 640
Расход тепла на догрев пиковой котельной после ТНУ	ГДж/год		1 638
Годовой расход природного газа	нм <sup>3</sup> /год т у. т.	1 111 580 1 255	54 397 61,4
Годовой расход газа (без ТНУ)	нм <sup>3</sup> /год т у. т.		1234 440 1 393
Экономия природного газа (при использовании ТНУ)	нм <sup>3</sup> /год т у. т.		1 167 560 1 330,8
Годовой расход электроэнергии	тыс. кВт-ч	251,52	158,62
Экономия электроэнергии	тыс. кВт-ч		92,9
Численность персонала	чел / сут		7
Ориентировочная стоимость ТНУ	тыс. грн		17 025
Ожидаемая экономия топливно-энергетических ресурсов:			
– в условном выражении	т у. т. / год		1 130,8
– в денежном выражении	тыс. грн.		2 903
Срок окупаемости	лет		16

Для оценки экологического эффекта производится расчет предотвращенного выброса вредных веществ в приземный слой атмосферы на котельной шахты «Северная» г. Дзержинска за счет установки тепловых насосов, использующих теплоту шахтной воды общей тепловой мощностью 3,4 МВт. Котельная предназначена для теплоснабжения на нужды шахты. Производится оценочный расчет для двух случаев эксплуатации ТГУ на органическом топливе: с использованием твердого топлива – угля марки ГР с низшей теплотой сгорания  $Q_n^p = 25,95$  МДж/кг, с использованием газообразного топлива. Согласно европейским нормам CORINAIR расчет ведется с использованием показателей эмиссии. Вероятность использования твердого топлива наиболее высока в случаях эксплуатации котельных на действующих шахтах Донбасса. При реконструкции, наоборот, чаще встречаются проекты с использованием котлов, работающих на газообразном топливе. В этом случае для сравнения приведен второй вариант расчета.

Эквивалентный расход угля  $B_{уг}$ , кг/с, рассчитывается по формуле

$$B_{уг} = \frac{W}{Q_n};$$

где  $W$  – номинальная мощность, МВт;

$Q_n$  – низшая рабочая теплота сгорания газа или угля, МДж/кг.

$$B_{уг} = \frac{3,4}{25,95} = 0,131 \text{ кг/с} = 1 \text{ 947 т/год}.$$

$$B_{уг} = \frac{3,4}{33,66} = 0,101 \text{ м}^3/\text{с} = 1 \text{ 501 091 м}^3/\text{год}.$$

Определение коэффициентов эмиссии для твердого топлива выполняется согласно [11].

Результаты расчетов приведены в таблицах 2...4.

Таблица 2 – Вредные выбросы при сжигании угля

Вредное вещество	Обозначение	Коэффициент эмиссии, г/ГДж	Вредный выброс, г/с
Твердые частицы	–	4 029	13,70
Диоксид серы	SO <sub>2</sub>	2 312	7,86
Оксиды азота	NO <sub>x</sub>	160	0,544
Оксид углерода	CO	1 900	6,46
Оксид диазота	N <sub>2</sub> O	1,4	0,00476
Метан	CH <sub>4</sub>	1	0,00340
Диоксид углерода	CO <sub>2</sub>	25 180	85,60

Таблица 3 – Выбросы тяжелых металлов при сжигании угля

Тяжелый металл	Обозначение	Концентрация, мг/кг	Вредный выброс, г/с
Мышьяк	As	20	0,002620
Оксид хрома	CrO <sub>3</sub>	90	0,011790
Медь	Cu	29	0,003799
Ртуть	Hg	0,28	0,0000367
Никель	Ni	26	0,003406
Свинец	Pb	20	0,002620
Цинк	Zn	40	0,005240

Таблица 4 – Вредные выбросы при сжигании газообразного топлива

Вредное вещество	Обозначение	Коэффициент эмиссии, г/ГДж	Вредный выброс, г/с
Оксиды азота	NO <sub>x</sub>	70	0,2380
Оксид углерода	CO	250	0,8499
Диоксид углерода	CO <sub>2</sub>	15 300	52,01
Оксид диазота	N <sub>2</sub> O	0,1	0,000340
Метан	CH <sub>4</sub>	1,0	0,00340
Ртуть	Hg	10 <sup>-4</sup>	3,40·10 <sup>-7</sup>

Результаты расчета вредных выбросов для газообразного топлива согласно методике [11] приведены в таблице 4.

## ВЫВОДЫ

1. Предложен алгоритм экономической оценки эффективности ТНУ, использующей теплоту шахтных вод. По результатам расчетов видно, что использование ТНУ, утилизирующей теплоту шахтной воды как для нужд теплоснабжения самих горнодобывающих предприятий, так и для теплоснабжения бытовых потребителей с учетом стоимости первичных топливно-энергетических ресурсов, является экономически оправданным и целесообразным.

2. По результатам расчётов предотвращенного выброса можно сказать, что внедрение ТНУ значительно сократит количество вредных выбросов загрязняющих веществ, парниковых газов и тяжелых металлов, что самым положительным образом скажется на непростой экологической обстановке в регионе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лук'янов, О. В. Шахтні води як джерело теплоти для систем тепlopостачання [Текст] / О. В. Лук'янов, С. І. Монах, Д. В. Выборнов // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2010. – Вип. 2010-6(68). – С. 90–95.
2. Выборнов, Д. В. Шахтний водовідлив – джерело теплової енергії [Текст] / Д. В. Выборнов // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2011. – Вип. 2011-5(91). – С. 98–105.
3. Горожанкин, С. А. Техническая и ресурсная составляющая процесса энергоресурсосбережения в Украине [Текст] / С. А. Горожанкин, Д. В. Выборнов, С. И. Монах // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2012. – Вип. 2012-2(94). – С. 3–8.

4. Мааке, В. Учебник по холодильной технике [Текст] / В. Мааке, Г.-Ю. Эккерт, Ж.-Л. Кошпен ; Перевод с французского д-ра техн. наук В. Б. Сапожникова. – Москва : Изд-во Ордена «Знак Почета» Московского университета, 1998. – 1135 с. – ISBN 2-85330-127-3.
5. Монах, С. И. Утилизация теплоты шахтных вод для нужд автономного теплоснабжения [Текст] / С. И. Монах, Д. В. Выборнов // Науковий вісник будівництва. – 2013. – Вип. 72. – С. 305–309.
6. Галимова, Л. В. Абсорбционные холодильные машины и тепловые насосы [Текст] : [Учебное пособие для специальностей «Техника и физика низких температур»] / Л. В. Галимова ; Астрахан. гос. тех. ун-т. – Астрахань : Изд-во АГТУ, 1997. – 226 с.
7. Горожанкин, С. А. Тепловая схема источника теплоснабжения с теплонасосной установкой (ТНУ) на шахтной воде [Текст] / С. А. Горожанкин, С. И. Монах, Д. В. Выборнов // Вестник АГТУ. – Астрахань, 2013. – № 2(56). – С. 15–20.
8. Выборнов, Д. В. Математическое моделирование тепловых потоков в теплонасосной установке, осуществляющей цикл квазидвухступенчатого сжатия с промежуточными теплообменными поверхностями [Текст] / Д. В. Выборнов, С. И. Монах // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2014. – Вип. 2014-3(107) : Наукове методичне, практичне забезпечення містобудування територіального стратегічного планування. – С. 7–12.
9. Выборнов, Д. В. Результати експериментально-аналітичних досліджень ефективності роботи теплонасосних установок [Текст] / Д. В. Выборнов, С. И. Монах // Холодильна техніка та технологія. – Одеса, 2014. – № 6(152). – С. 26–31.
10. Трубаев, П. А. Тепловые насосы [Текст] : [Учеб. пособие] / П. А. Трубаев, Б. М. Гришко. – Белгород : Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2009. – 142 с.
11. ГКД 34.02.305-2002. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от энергетических установок [Текст] / Методика определения / Научно-технологический центр «РЕАКТИВЭЛЕКТРОН» Национальной академии наук Украины (НТЦ НАН Украины). – К. : КВЦ, 2002. – 44 с. (Нормативный документ).

Получено 09.09.2015

**Д. В. ВИБОРНОВ, С. І. МОНАХ**  
**ЕКОНОМІЧНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТНУ, ЩО**  
**ВИКОРИСТОВУЮТЬ ТЕПЛОТУ ШАХТНИХ ВОД**  
 Донбаська національна академія будівництва і архітектури

Виконано аналіз роботи парокомпресійної теплонасосної установки (ТНУ), що використовує теплоту шахтної води для потреб теплопостачання з економічної та екологічної точки зору. Зроблені розрахунки на прикладі шахти у м. Дзержинськ.

**теплонасосна установка, інвестиції, окупність, теплова потужність, економічний ефект**

**DMITRY VYBORNOV, SVETLANA MONAKH**  
**ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL EFFICIENCY HEAT PUMPS, USE HEAT**  
**MINE WATERS**  
 Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

The analysis of the works of the vapor compression heat pump unit (heat pump), using heat of mine water for heating needs from the economic and environmental point of view, has been carried out. Calculations on the example of mine in the town of Dzerzhinsk have been done.

**heat pump system, investments, return on investment, heat capacity, the economic effect**

**Выборнов Дмитро Володимирович** – аспірант кафедри теплотехніки, теплогазопостачання і вентиляції Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: енергоощадження в системах теплопостачання та гарячого водопостачання з використанням теплонасосних технологій.

**Монах Світлана Ігорівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання і вентиляції Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: енергоощадження в системах теплопостачання при впровадженні теплонасосних та когенераційних технологій виробництва енергоносіїв.

**Выборнов Дмитрий Владимирович** – аспирант кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: энергосбережение в системах теплоснабжения и горячего водоснабжения с использованием теплонасосных технологий.

**Монах Светлана Игоревна** – кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: энергосбережение в системах теплоснабжения при внедрении теплонасосных и когенерационных технологий производства энергоносителей.

**Vybornov Dmitry** – a post-graduate student, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: energy saving in heat and hot water supply systems with use of heat pump technics.

**Monakh Svetlana** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: heat saving in heat supply systems with introduction of heat pump and cogeneration technologies of energy carry production.

УДК 631.95+620.91

**Н. В. КОЛОСОВА, С. И. МОНАХ**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## **ОЦЕНКА ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ПРИ ХРАНЕНИИ ОТХОДОВ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ФЕРМ**

Одним из основных источников выбросов парниковых газов является сельское хозяйство. Отходы животноводческих ферм наиболее пагубно влияют на окружающую среду. В статье рассмотрен процесс образования парниковых газов из отходов фермерского хозяйства (биомасса). Определена эмиссия основных парниковых газов (метана и закиси азота) выделяющихся от систем хранения и использовании отходов животноводческих ферм. Определено годовое количество выбросов парниковых газов в  $\text{CO}_2$ -эквиваленте. Предложен метод предотвращения выбросов парниковых газов, который предполагает получение биогаза за счет анаэробной переработки биомассы.

**антропогенные выбросы, парниковые газы, эмиссия метана и закиси азота, биогаз**

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

В XXI веке перед человечеством стоит ряд острых проблем, разрешение которых возможно только на мировом уровне. К основным проблемам относятся истощение природных ресурсов и состояние окружающей среды.

Использование природных энергетических (невозобновляемых) ресурсов со временем приведет к полному их исчерпанию. Целью человечества является поиск новых альтернативных энергетических ресурсов и их целесообразное применение. Основными альтернативными источниками для производства энергии являются солнечная энергия, энергия ветра, геотермальная энергия, энергия биомассы. Дополнительное преимущество альтернативных источников энергии является отсутствие негативного воздействия на окружающую среду.

Экологическое состояние окружающей среды значительно ухудшилось за последние полвека в результате стремительного развития промышленности. Наибольшее количество загрязняющих веществ приходится на антропогенные выбросы, вызывающие парниковый эффект. К антропогенным парниковым газам относят: диоксид углерода, метан, закись азота, перфторуглероды и гидрофторуглероды [1]. Метан стоит на втором месте по объему парниковых газов после диоксида углерода, но его потенциальный вклад в глобальное потепление выше в 25 раз. Поданным организации Global Methane Initiative (GMI) эти выбросы в основном выделяются от пяти источников: предприятия нефтегазового комплекса, полигоны твердых бытовых отходов, сточные воды, угольные шахты и сельское хозяйство. Согласно оценкам GMI глобальный объем антропогенных выбросов метана в 2010 г. составил 6 875 млн т эквивалента  $\text{CO}_2$ .

Современная наука направлена на разработку технологий, связанных с развитием и внедрением в промышленность и коммунальную энергетику альтернативных, возобновляемых источников энергии, с целью уменьшения потребления ископаемых ресурсов и антропогенных выбросов в окружающую среду.

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

Как уже было отмечено, сельское хозяйство, а именно животноводство, является одним из основных источников выбросов парниковых газов в атмосферу. На животноводческих фермах загрязнение атмосферы происходит от двух источников. Первым источником загрязнения является

кишечная ферментация животных, в результате которой в атмосферу поступает метан ( $\text{CH}_4$ ). Вторым источником выбросов метана и закиси азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ) являются системы уборки и хранения биомассы.

Уменьшение выбросов метана от кишечной ферментации можно достигнуть путем изменения состава кормов и рациона животных.

В настоящей работе рассмотрено образование вредных выбросов от отходов животноводческой фермы при их уборке и хранении.

Метан образуется в результате разложения биомассы на животноводческих и птицеводческих фермах при ее хранении или переработке в системах, способствующих возникновению анаэробных условий.

Украина в связи с экономическим спадом в период с 1990 по 2003 г., снизила производительность сельского хозяйства. Это привело к уменьшению выбросов парниковых газов: метана в 3 раза, закиси азота в 2,3 раза [2].

По данным ГМИ мировой объем выбросов метана составляет 243,95 млн т эквивалента  $\text{CO}_2$  в 2010 год из отходов сельского хозяйства. Для уменьшения выбросов от отходов животноводческих ферм применяются различные способы улавливания выделяющихся парниковых газов.

Выбросы метана и оксида азота при хранении или переработке биомассы могут быть уменьшены с помощью различных технологий. Наиболее распространенным является метод анаэробной переработки биомассы в специальных емкостях – метантенках. К достоинствам этой технологии относятся: производство биогаза, получение удобрения, снижение выбросов вредных веществ.

## ЦЕЛИ

Целью работы является определение количества метана и закиси азота, выделяющихся при хранении отходов животноводческой фермы молочной направленности и предложение способа уменьшения выбросов парниковых газов в атмосферу.

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

В Украине на крупных животноводческих фермах навоз хранят в анаэробных прудах или навозохранилищах, что приводит к созданию условий для образования парниковых газов [1].

Интенсивность образования метана из биомассы зависит от следующих факторов [1]: условий хранения навоза (в жидком или твердом виде); типа климата (холодный, умеренный или теплый); состава кормовых рационов для животных; вида навоза (навоз крупного рогатого скота (КРС), свиней, овец, птицы и т. д.); содержания сухого вещества в навозе.

При оценке выбросов метана от биомассы различных видов животных, имеющих на животноводческих фермах, следует учитывать поголовье животных по подгруппам и определить интенсивность выбросов в расчете на одно животное для каждой из подгрупп. Отходы КРС являются наиболее существенными источниками выбросов метана.

В данной статье анализируются выбросы от хранения отходов КРС, следовательно, рассматриваются следующие категории источников выбросов: выбросы  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}$  от систем сбора и хранения биомассы.

Для проведения расчета выбросов парниковых газов от животноводческих ферм необходимы исходные данные по поголовью скота. Исследования проведены для животноводческой фермы, в которой имеется 6 тысяч голов КРС.

Расчет выбросов  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}$  производился по упрощенной методике, приведенной в работе [3].

Эмиссия метана от систем хранения навоза определяется по формуле

$$M_{\text{CH}_4} = EF_{\text{CH}_4} \cdot n, \quad (1)$$

где  $M_{\text{CH}_4}$  – эмиссия метана от систем хранения навоза, кг  $\text{CH}_4$ /год,  
 $EF_{\text{CH}_4}$  – коэффициент эмиссии метана от навоза для сельскохозяйственных животных, (кг/(гол. год)). Принимается по [3] и равняется 4,6 кг  $\text{CH}_4$ /(гол. в год).  
 $n$  – количество животных в группе, 6 000 голов КРС.

Оценка эмиссии  $\text{N}_2\text{O}$  при хранении и использовании навоза рассчитывается по следующей формуле

$$M_{\text{N}_2\text{O}} = N_{\text{ex}} \cdot EF_{\text{N}_2\text{O}} \cdot n, \quad (2)$$

где  $M_{N_2O}$  – эмиссия  $N_2O$  от систем хранения и использования отходов животных (кг / год);  
 $N_{ex}$  – поступление азота, содержащегося в навозе при данной системе хранения и использования отходов животных (кг  $N_2O$ /гол. в год) Принимается по [3] и равняется 89,64 кг  $N_2O$  /гол. в год;  
 $EF_{N_2O}$  – коэффициент эмиссии  $N_2O$  для различных систем хранения навоза (кг  $N_2O$  в год).

Коэффициент эмиссии  $N_2O$  жидкостной системы хранения отходов животных равен 0,001 [3].

По формуле (1) определена эмиссия метана от систем хранения биомассы КРС на животноводческой ферме,  $M_{CH_4} = 27\,600$  кг/год. В пересчете на  $CO_2$ -эквивалент эмиссия метана равняется 579,6 тонн в год.

Эмиссия  $N_2O$  при хранении и использовании биомассы для рассматриваемой животноводческой фермы равна  $M_{N_2O} = 845,17$  кг/год. В пересчете на  $CO_2$ -эквивалент это составляет 262,0 тонн в год.

Сумма выбросов  $CH_4$  и  $N_2O$  в  $CO_2$ -эквиваленте от систем сбора и хранения биомассы для рассматриваемой фермы, общая годовая эмиссия составляет 841,6 тонн  $CO_2$ -эквивалента.

Известны различные аппараты и системы, разработанные с целью обработки и обеззараживания отходов животноводческих ферм [4]. К таким аппаратам относятся крытые анаэробные отстойники или метантенки для анаэробного сбраживания.

Анаэробная ферментация биомассы в метантенке, при соблюдении технологических параметров, сопровождается производством биогаза [5]. С целью уменьшения выбросов  $CH_4$  и  $N_2O$  от систем хранения и использования навоза КРС произведен расчет определения количества получаемого биогаза при сбраживании биомассы в метантенке, для рассматриваемой животноводческой фермы.

Для определения суточного выхода биогаза необходимо рассчитать содержание сухого вещества в навозе КРС.

Содержание сухого вещества (СВ)  $M_{CB}$  в навозе определяется по формуле:

$$M_{CB} = n_{KPC} \cdot m_{KPC} \cdot (1 - \gamma) \cdot r_{KPC}, \quad (3)$$

где  $n_{KPC}$  – количество голов КРС;  
 $m_{KPC}$  – усредненная масса навоза от одной головы КРС, кг/сутки, принимается по данным [4].  
 $\gamma$  – потери сырья при транспортировке навоза от фермы к метантенку и при подготовке его к сбраживанию, до 5 % от общей массы.  
 $r_{KPC}$  – доля СВ в навозе КРС, принимается по данным [4].

Количество получаемого биогаза  $V_{BG}$  определяется по формуле:

$$V_{BG} = M_{CB} \cdot V'_{BG}, \quad (4)$$

где  $V'_{BG}$  – выход биогаза на 1 кг сухого вещества, м<sup>3</sup>. Принимается по данным, приведенным в [4].

По разработанной авторами программе расчета выхода биогаза из отходов животноводческих ферм рассчитано суточное производство биогаза. Для рассматриваемой животноводческой фермы суточный выход биогаза составил 9 850 м<sup>3</sup>/сутки. Годовое производство биогаза составляет 3,4 млн м<sup>3</sup>.

## ВЫВОДЫ

По результатам проведенного расчета можно сделать вывод, что применение анаэробной технологии переработки биомассы с целью получения биогаза приводит к значительному снижению выбросов  $CH_4$  и  $N_2O$  в атмосферу, тем самым уменьшая парниковый эффект, а также решает проблему, связанную с энергообеспечением животноводческого комплекса делая его энергонезависимым за счет использования полученных 8,1 т.у.т./в год. Получение количественной зависимости снижения выбросов  $CH_4$  и  $N_2O$  от поголовья скота и способа хранения биомассы является задачей последующих исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов в Украине за 1990–2007 гг. [Электронный ресурс] / авт. проекта М. В. Березницкая, О. В. Бутрим, Г. Г. Панченко [и др.]. – К. : Министерство охраны окружающей природной среды Украины, 2008. – 319 с. – Режим доступа : [http://climategroup.org.ua/upl/Nac\\_zvit\\_p\\_parn\\_gazy\\_90-07.pdf](http://climategroup.org.ua/upl/Nac_zvit_p_parn_gazy_90-07.pdf).



2. Национальный отчет о кадастре парниковых газов в Украине за 2003 год [Текст]. Том 1 / Министерство охраны окружающей природной среды Украины. – К. : [б. и.], 2005. – 78 с.
3. Методические указания по расчету выбросов парниковых газов в атмосферу от домашнего скота: внутренняя ферментация и навоз [Текст] : Руководящий нормативный документ / составитель РГП «КазНИИЭК» МООН РК. – Астана : [б. и.], 2010. – 17 с. – (Система нормативных документов по охране окружающей среды).
4. Олексюк, А. О. Енергозбереження при використанні нетрадиційних джерел. Навчальний посібник [Текст] / А. О. Олексюк, В. А. Сербін, Н. Ф. Радько. – Донецьк : ДАЖКГ Держжитлокомунгоспу України, 2004. – 156 с.
5. Дубровский, В. С. Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов [Текст] / В. С. Дубровский, У. Э. Виестур. – Рига : Зинатне, 1988. – 204 с.

Получено 10.09.2015

**Н. В. КОЛОСОВА, С. І. МОНАХ**  
**ОЦІНКА ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ПРИ ЗБЕРІГАННІ ВІДХОДІВ**  
**ТВАРИННИЦЬКИХ ФЕРМ**  
Донбаська національна академія будівництва і архітектури

Одним з основних джерел викидів парникових газів є сільське господарство. Відходи тваринницьких ферм найбільш згубно впливають на навколишнє середовище. У статті розглянуто процес утворення парникових газів з відходів фермерського господарства (біомаса). Визначена емісія основних парникових газів (метану і закису азоту), що виділяються від систем зберігання і використанні відходів тваринницьких ферм. Визначена річна кількість викидів парникових газів в CO<sub>2</sub>-еквіваленті. Запропоновано метод запобігання викидів парникових газів, який передбачає отримання біогазу за рахунок анаеробної переробки біомаси.

**антропогенні викиди, парникові гази, емісія метану та закису азоту, біогаз**

**NELLY KOLOSOVA, SVETLANA MONAKH**  
**EVALUATION OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM LIVESTOCK FARMS**  
**WASTE STORAGE**  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

One of the main sources of greenhouse gas emissions is agriculture. Waste livestock farms are the most detrimental effect on the environment. The article describes the process of the formation of greenhouse gases from waste farm (biomass). The emissions of the main greenhouse gases (methane and nitrous oxide) emitted from the storage and use of waste of livestock farms, has been determined. The annual quantity of greenhouse gas emissions in CO<sub>2</sub>-equivalent has been also determined. A method for preventing the emission of greenhouse gases by anaerobic digestion of biomass, which involves obtaining biogas, has been suggested.

**anthropogenic emissions of greenhouse gases, emissions of nitrous oxide and methane, biogas**

**Колосова Неллі Вадимівна** – аспірант кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: енергоресурсоощадження.

**Монах Світлана Ігорівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: інноваційні технології енергоощадження.

**Колосова Нелли Вадимовна** – аспирант кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: энергоресурсосбережение.

**Монах Светлана Игоревна** – кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: инновационные технологии энергосбережения.

**Kolosova Nelly** – a post-graduate student, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: saving of energy resources.

**Monakh Svetlana** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: energy conservation in heat supply systems.

УДК 628.368

**В. Н. ЧЕРНЫШЕВ, О. И. ТИЩЕНКО**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## **СТЕПЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КИСЛОРОДА ПРИ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ АЭРАЦИИ ЧЕРЕЗ РУКАВНЫЕ ТКАНЕВЫЕ АЭРАТОРЫ**

Степень использования кислорода в числе других показателей дает возможность обоснованного подбора конструкции аэратора под конкретные задачи аэрации. Известно, что многие конструкции аэраторов склонны к закупоркам биологическими обрастаниями и кальматации иловыми частицами. Рукавные тканевые аэраторы надежны в эксплуатации, не подвергаются закупоркам и характеризуются невысокой стоимостью. Экспериментами показано, что на степень использования кислорода при аэрации через тканевые аэраторы значительное влияние оказывает нагрузка по воздуху. Даны рекомендации по использованию рукавных тканевых аэраторов в различных сооружениях.

**аэротенки, аэраторы, показатели работы, рукавные тканевые аэраторы, степень использования кислорода, нагрузка по воздуху, экспериментальные исследования**

Эффективность биологической очистки сточных вод в аэротенке в значительной степени зависит от параметров работы его аэрационной системы. Как известно, аэрационная система должна обеспечивать надежное снабжение микроорганизмов активного ила растворенным кислородом, создавать оптимальные гидродинамические условия для массообменных процессов, предотвращать образование застойных зон и залегание активного ила в сооружении. Для аэрации иловой смеси в аэротенках наибольшее распространение получила пневматическая система, обеспечивающая диспергирование воздуха в основном через пористые материалы и ткани. От правильной работы аэраторов в большой степени зависят эффективность и экономические показатели биологической очистки. Среди основных факторов, влияющих на работу пневматических аэраторов, следует назвать размеры пор пневматических аэраторов, глубину их погружения, количество подаваемого в них воздуха, размещение аэраторов по площади аэротенков. На формирование гидродинамической структуры потока иловой смеси в аэротенке, определяющей скорость массообменных процессов, существенное влияние оказывает соотношение площади аэрируемой полосы к общей площади сооружения [1].

Большое разнообразие применяемых в настоящее время аэраторов ставит перед проектировщиками задачу выбора не только системы аэрации, но и ее конструктивного оформления для каждого конкретного случая применения аэрационных сооружений для биологической очистки сточных вод. Выбор аэратора должен быть сделан на основе сравнения наиболее существенных показателей работы. К таким показателям следует отнести эффективность аэрации, окислительную способность аэратора, степень использования кислорода. Некоторые авторы предлагают использовать при выборе системы аэрации обобщенный критерий аэрации [2].

В настоящее время разработчиками предлагается большой спектр аэраторов с различными характеристиками. Однако многим типам пневматических аэраторов свойственна постепенная закупорка пор за счет биообрастаний и кальматации иловыми частицами. Это приводит к увеличению сопротивления аэраторов подаче воздуха в аэротенки и снижению их производительности. Особенно интенсивно закупорка происходит при внезапном прекращении подачи воздуха, когда иловая смесь может поступать во внутреннюю полость аэраторов. Последующая подача воздуха приводит к закупорке пор уже изнутри аэратора. Предварительная продувка аэраторов способна привести к возникновению гидравлического удара и выходу их из строя. С этой точки зрения преимуществами обладают рукавные тканевые аэраторы [3]. Такая конструкция препятствует поступлению внутрь

аэратора иловой смеси при отключении подачи воздуха, кроме того, дает возможность регенерировать ткань более интенсивной кратковременной подачей воздуха через аэраторы. Многолетняя эксплуатация рукавных тканевых аэраторов показала достаточно высокую их надежность при эксплуатации. Невысокая стоимость в совокупности с надежностью предполагает и широкое применение рукавных тканевых аэраторов в сооружениях по очистке сточных вод и обработке осадков. Однако недостаточная изученность характеристик работы и отсутствие рекомендаций по их применению в различных условиях сдерживает этот процесс.

Как было отмечено ранее, одним из существенных параметров, характеризующим технологическую эффективность аэраторов, является степень использования кислорода. Известно, что степень использования кислорода при аэрации воздухом отражает отношение количества растворившегося кислорода в воде к количеству кислорода, содержащемуся в поступившем в аэратор воздухе. Степень использования кислорода, как правило, определяют экспериментальным путем. Для сравнительной оценки аэраторов различных типов и конструкций это определение проводят при дефиците кислорода, равном 1.

Степень использования кислорода можно также определить теоретическим расчетом, используя инженерную модель аэрации [1], которая справедлива для единично всплывающих пузырьков воздуха в чистой воде. Для аэрации иловой смеси аэротенка используется уточненная модель. Степень использования кислорода по уточненной модели определяется из выражения:

$$A_{\text{уточ}} = k_{\text{и}} \cdot k_{\text{с}} \cdot k_{\text{к}} \cdot A_{\text{инж}}, \quad (1)$$

где  $k_{\text{и}}$  – коэффициент истощения;  
 $k_{\text{с}}$  – коэффициент струйности;  
 $k_{\text{к}}$  – коэффициент качества;  
 $A_{\text{инж}}$  – степень использования кислорода в соответствии с инженерной моделью.

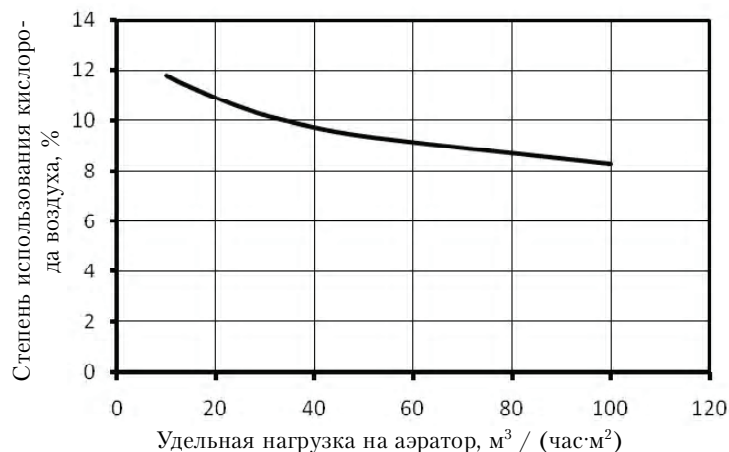
Коэффициент истощения учитывает влияние на скорость массопередачи снижения содержания кислорода в газовой среде пузырьков воздуха при их всплывании. Очевидно, что с увеличением степени использования кислорода этот коэффициент уменьшается. Так, по литературным данным при увеличении степени использования кислорода с 1,5 до 15,0 %, коэффициент истощения уменьшается с 0,99 до 0,91. Коэффициент струйности отражает влияние на массоперенос кислорода режима аэрации. В общем случае режимы аэрации подразделяют на пузырьковый, факельный и струйный. Пузырьковый режим характеризуется небольшими расходами воздуха и зависимостью крупности пузырьков от размера пор аэраторов. При этом скорость выхода из пор воздуха не превышает скорость всплывания пузырьков. Если скорость выхода из пор воздуха превышает скорость всплывания пузырьков, то над порами образуется факел, в котором происходит как дробление воздуха на пузырьки, так и их коалесценция. Такой режим называется факельным. При этом режиме крупность пузырьков уже не зависит от размера пор, а определяется гидродинамическими показателями среды. Значительные нагрузки по воздуху могут привести к его проскоку через жидкость в виде сплошных струй, такой режим называется струйным, практически он возникает в аварийных ситуациях. Таким образом, переход от одного режима к другому происходит при изменении количества подаваемого воздуха через аэратор, или точнее нагрузки по воздуху на аэратор.

Как известно из литературы, границы режимов аэрации ориентировочно соответствуют следующим предельным значениям удельной нагрузки на аэратор:

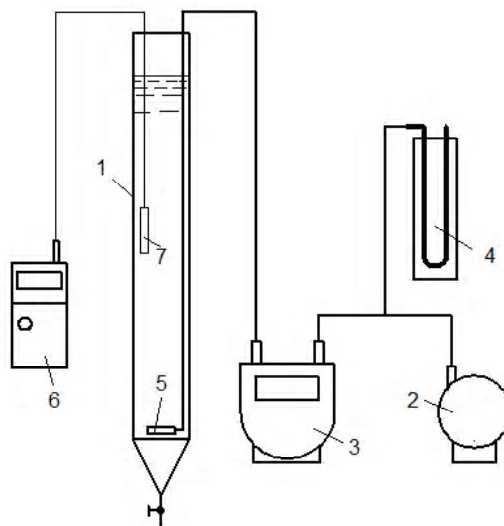
- при пузырьковом режиме до  $25 \text{ м}^3/(\text{час} \cdot \text{м}^2)$ ;
- при факельном режиме до  $100 \text{ м}^3/(\text{час} \cdot \text{м}^2)$ ;
- при струйном режиме выше  $100 \text{ м}^3/(\text{час} \cdot \text{м}^2)$ .

С точки зрения степени использования кислорода самым эффективным является пузырьковый режим, поскольку характеризуется меньшими размерами пузырьков, а следовательно, при одном и том же количестве подаваемого воздуха большими значениями удельной поверхности раздела фаз.

Этот вывод подтверждается графиком, представленным на рисунке 1. График, соответствующий глубине погружения аэратора 4 м, построен с учетом выражения (1) на основе инженерной модели процесса по данным, приведенным в литературном источнике [1]. Из рисунка следует, что увеличение нагрузки по воздуху на аэратор приводит к снижению степени использования кислорода. Отсутствие аналогичных данных о рукавных тканевых аэраторах вызывает необходимость экспериментального изучения процесса аэрации с помощью таких аэраторов. Схема экспериментальной аэрационной установки приведена на рисунке 2. В экспериментах для аэрации использовалась



**Рисунок 1** – Влияние удельной нагрузки на аэратор по воздуху на степень использования кислорода.



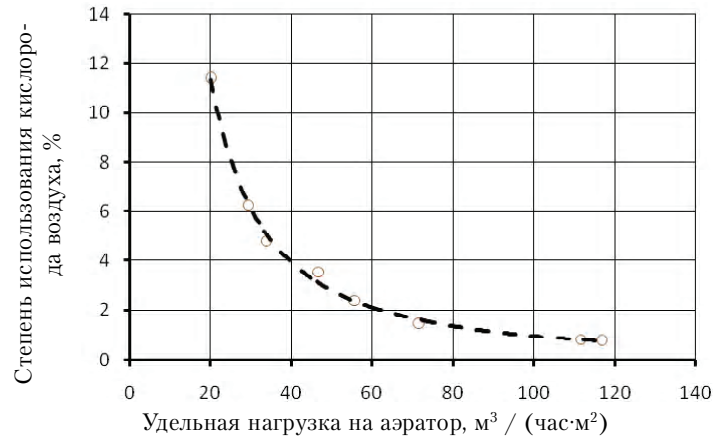
**Рисунок 2** – Схема экспериментальной установки: 1 – аэрационная колонна; 2 – воздушодувка; 3 – газовый счетчик; 4 – ртутный манометр; 5 – тканевый аэратор; 6 – кислородомер АЖА-101М; датчик кислородомера.

предварительно обескислороженная водопроводная вода. Обескислороживание осуществлялось сульфитным методом. Контроль концентрации кислорода в воде аэрационной колонны осуществлялся с помощью кислородомера АЖА-101М. Потребление кислорода рассчитывалось по убыли сульфита натрия за время аэрации. При выполнении экспериментов параллельно фиксировались температура и барометрическое давление. Эксперименты проводились при различных нагрузках на аэратор по воздуху. Степень использования кислорода вычислялась отношением потребленного кислорода на окисление сульфита натрия к количеству кислорода, содержавшегося в поданном на аэрацию воздухе. Результаты вычислений приведены к глубине погружения аэраторов 4 м с использованием следующего выражения:

$$A_4 = A_{0,81} \cdot (h_4 / h_{0,81})^{0,7} \quad (1),$$

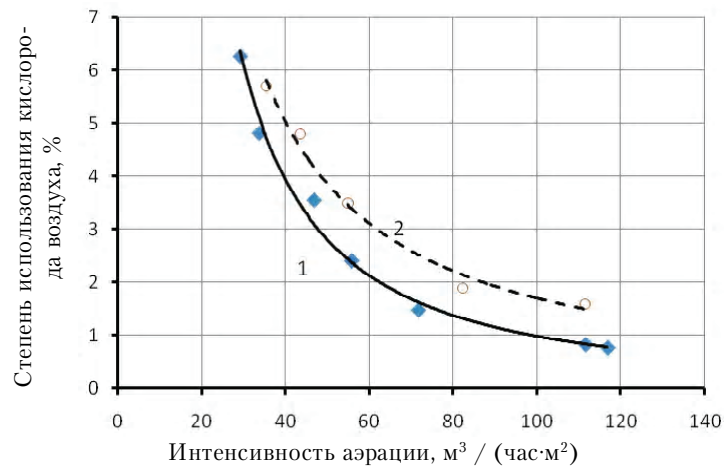
где  $A_4$  – степень использования кислорода при глубине погружения аэратора  $h_4 = 4$  м;  
 $A_{0,81}$  – степень использования кислорода при глубине погружения аэратора в экспериментальной установке  $h_{0,81} = 0,81$  м.

На основании полученных экспериментальных данных построен график зависимости степени использования кислорода от удельной нагрузки на тканевый аэратор (рис. 3).



**Рисунок 3** – Влияние удельной нагрузки на тканевый аэратор на степень использования кислорода.

Предположение косвенно подтверждается экспериментальными данными, когда в аэрационную колонну экспериментальной установки помещались два одинаковых по размеру аэратора. В экспериментах аэрация осуществлялась сначала через один аэратор, а затем через два. При различных расходах воздуха в аэрационной колонне фиксировалась интенсивность аэрации и в воде до и после аэрации определялось содержание сульфита натрия, по которому вычислялась степень использования кислорода. Результаты экспериментов приведены на рис. 4. Следует заметить, что в данных экспериментах интенсивность аэрации вычислялась как отношение расхода воздуха к площади аэрационной колонны.



**Рисунок 4** – Влияние интенсивности аэрации через тканевые аэраторы на степень использования кислорода:  
1 – при одном установленном аэраторе; 2 – при двух установленных аэраторах.

Из рисунка следует, что при одинаковых интенсивностях аэрации степень использования кислорода выше в случае аэрации через два аэратора, поскольку нагрузка на один аэратор в данном случае в два раза ниже, чем при подаче воздуха через один аэратор. Большая нагрузка ведет к образованию и более крупных пузырьков, а следовательно, к снижению скорости массопередачи и степени использования кислорода [1].

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что выбор режима аэрации при использовании рукавных тканевых аэраторов зависит от уровня нагрузки по БПК, при которой работают сооружения, использующие аэробные биологические процессы. При повышенных нагрузках, когда первоочередная задача аэрации состоит в обеспечении биологических процессов растворенным кислородом, режим аэрации должен обеспечивать максимальную степень использования кислорода. При этом нагрузка на аэраторы по воздуху не должна превышать  $25 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{час})$ , что соответствует

производительности аэраторов 11–12 м<sup>3</sup>/(пог. м·час). Сооружения, где скорости биологических процессов достаточно низкие (аэротенки продленной аэрации, аэробные минерализаторы, сооружения глубокой минерализации [4]), а значительная часть воздуха идет на создание необходимых скоростей циркуляции иловой смеси, то производительность аэраторов должна обеспечивать нагрузку по воздуху в аэрируемой зоне, превышающую 25 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·час).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попкович, Г. С. Системы аэрации сточных вод [Текст] / Г. С. Попкович, Б. Н. Репин. – М. : Стройиздат, 1986. – 136 с.
2. Серпокрьлов, Н. С. Сравнительная оценка аэраторов для очистки сточных вод по обобщенному критерию аэрации [Текст] / Н. С. Серпокрьлов, А. С. Смоляниченко, И. И. Лесников // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. – 2011. – № 2. – С. 97–100.
3. Нездойминов, В. И. Совершенствование конструкции аэраторов тонкого диспергирования [Текст] / В. И. Нездойминов // Вестник Донбасской государственной академии строительства и архитектуры. – 1996. – Вып. 96-3(4). – С. 31–32.
4. Чернышев, В. Н. Глубокая минерализация в технологии обработки осадков городских сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов [Текст] / В. Н. Чернышев, В. И. Нездойминов, В. Ф. Кижаяев // Водопостачання та водовідведення. – 2011. – № 5. – С. 15–22.
5. Серпокрьлов, Н. С. Снижение энергопотребления систем аэрации сточных вод [Текст] / Н. С. Серпокрьлов, А. С. Смоляниченко // Вестник ТГАСУ. Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов. – 2010. – № 3. – С. 192–199.

Получено 11.09.2015

#### В. М. ЧЕРНИШЕВ, О. І. ТИЩЕНКО СТУПІНЬ ВИКОРИСТАННЯ КИСНЮ ПРИ ПНЕВМАТИЧНІЙ АЕРАЦІЇ ЧЕРЕЗ РУКАВНІ ТКАНІННІ АЕРАТОРИ

Донбаська національна академія будівництва і архітектури

Ступінь використання кисню в числі інших показників дає можливість обґрунтованого підбору конструкції аератора під конкретні завдання аерації. Відомо, що багато конструкцій аераторів схильні до закупорювання біологічними обростаннями й кальматациї муловими частинками. Рукавні тканинні аератори надійні в експлуатації, не зазнають закупорювання і характеризуються невисокою вартістю. Експериментами доказано, що на ступінь використання кисню при аерації через тканинні аератори значно впливає навантаження по повітрю. Надано рекомендації з використання рукавних тканинних аераторів у різних спорудах.

**аэротенки, аэратопри, показники роботи, рукавні тканинні аэратопри, ступінь використання кисню, навантаження по повітрю, експериментальні дослідження**

#### VALENTIN CHERNYSHEV, OLGA TISCHENKO DEGREE OF USING OF THE OXYGEN IN PNEUMATIC AERATION SYSTEM WITH FABRIC AERATORS

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

The degree of the use of oxygen, among other parameters allows the selection of design for aerator with specific tasks of aeration. We know that many construction aerators are prone to blockages and clogged after biofouling as sludge particles. Bag fabric aerators reliable in operation, are not subject to blockages, and are characterized by low cost. Experiments have shown that the degree of using of oxygen in the aeration through the fabric aerators has a significant load effect on air. Recommendations on the use of fabric bag aerators in a variety contractures.

**aeration tank, aerators, performance, bag fabric aerators, using of the oxygen, air load, experimental studies**

**Чернишев Валентин Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри водопостачання, водовідведення і охорони водних ресурсів Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: інтенсифікація існуючих методів і створення нових технологічних схем очищення стічних вод і оброблення осаду.

**Тищенко Ольга Ігорівна** – магістрант кафедри водопостачання, водовідведення і охорони водних ресурсів Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: удосконалювання систем аерації споруд біологічного очищення стічних вод.

**Чернышев Валентин Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: интенсификация существующих методов и создание новых технологических схем очистки сточных вод и обработки осадка.

**Тищенко Ольга Игоревна** – магистрант кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: совершенствование систем аэрации сооружений биологической очистки сточных вод.

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

**Tischenko Olga** – master student, Water Supply, Water Disposal and Water Resources Conservation and Protection Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: improvement of the systems to aerations of the buildings biological peelings sewages.

УДК 628.16.0

**А. Я. НАЙМАНОВ, А. С. ТРЯКИНА**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## **ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТНОГО СОСТАВА ВОДЫ ПРИ ВЫБОРЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ОЧИСТКИ НА ОСНОВАНИИ МНОГОЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ**

В работе представлена математико-статистическая обработка данных показателей качества воды, влияющих на подбор технологической схемы очистки. Определены расчетные значения показателей качества воды и расчетные продолжительности стояния повышенных величин мутности и цветности воды при различных величинах обеспеченности. Выполнен расчет снижения производительности очистных сооружений с одноступенчатым фильтрованием в сравнении со стандартной двухступенчатой схемой очистки. Предложена методика определения расчетных показателей качества воды при выборе технологической схемы очистки.

**показатели качества воды, водопроводные очистные сооружения, технологическая схема очистки**

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Определяющее влияние на состав очистных сооружений водопровода оказывает расчетный состав воды в источнике водоснабжения. Показатели качества воды в поверхностных источниках обычно испытывают значительные колебания как по сезонам года, так и по годам наблюдений. Нормативные документы [1, 2] требуют назначать состав очистных станций водопровода по максимальным величинам показателей за все годы наблюдений, но не менее трех лет. Это требование приводит в ряде случаев к значительному удорожанию очистных станций при их строительстве и эксплуатации.

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

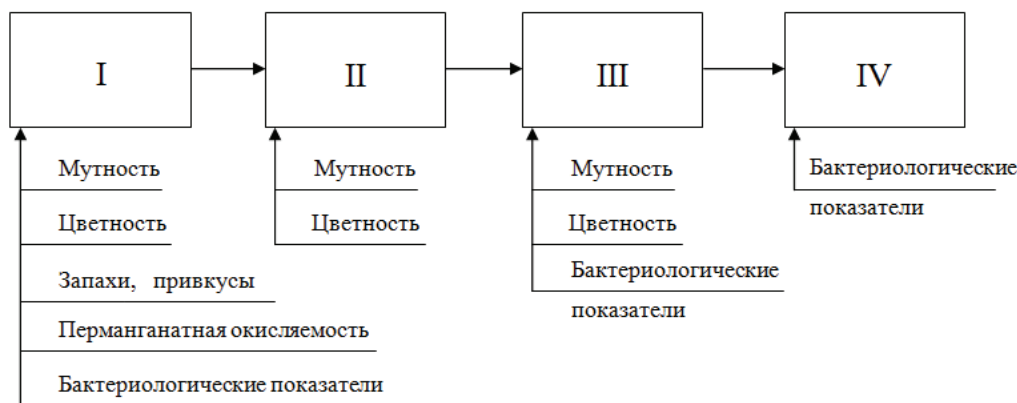
В практике проектирования и эксплуатации водопроводных очистных сооружений инженерные методы и технологии использования гидрохимической информации недостаточно разработаны и не дают четких рекомендаций обработки, анализа и расчетов исходных данных по водоисточникам. Для снижения затрат при проектировании, строительстве или реконструкции водопроводных очистных сооружений требуется научно обоснованное снижение максимальных значений расчетных концентраций ингредиентов при одновременном сохранении санитарно-гигиенической надежности проектируемых сооружений. В России этим вопросом занимаются Ж. М. Говорова, А. О. Родина, Ж. М. Говоровой была разработана новая методика оценки качества исходной воды, основанная на взаимосвязи индекса показателя качества воды с показателями риска здоровья населения от кратковременного превышения остаточных концентраций лимитируемых ингредиентов в очищенной воде над их ПДК и потенциальными возможностями назначаемой технологической схемы очистки воды [3]. А. О. Родина разработала методику обоснования расчетных показателей качества поверхностных вод при выборе водоочистных технологий с применением риска от химического загрязнения воды [4].

**Целью** предложенной работы является обоснование расчетного состава воды при выборе технологической схемы очистки на основании многолетних наблюдений.



## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Первоначально необходимо определить, какие из показателей качества воды являются наиболее значимыми при подборе технологии водоподготовки. На рис. 1 представлены основные блоки существующей технологической схемы очистки на Макеевской фильтровальной станции (МФС). На блок-схеме указаны показатели качества воды, которые влияют на подбор каждого конкретного сооружения или применяемого реагента.



**Рисунок 1** – Показатели качества воды, влияющие на подбор сооружения и реагентов: I – смеситель, обработка реагентами; II – камеры хлопьеобразования, горизонтальные отстойники; III – дополнительное хлорирование, скорые безнапорные фильтры; IV – вторичное хлорирование, резервуар чистой воды.

Необходимые реагенты. В начало смесителя вводятся: хлор, коагулянт, перманганат калия, активированный уголь, в конце – флокулянт и известь. Коагулянт и хлор вводятся постоянно, остальные реагенты периодически, при технологической необходимости.

Второй блок включает в себя камеры хлопьеобразования и горизонтальные отстойники. В камерах хлопьеобразования происходит укрупнение коллоидных частиц, которые образуются в результате гидролиза коагулянта в смесителе, и образование хлопьев. В отстойниках происходит осаждение образовавшихся хлопьев.

Третий блок включает дополнительное хлорирование и фильтрование. Для обеспечения эффективной работы очистных сооружений по удалению вирусов в период их повышенного распространения на МФС осуществляется дополнительный ввод хлора перед фильтрами. Фильтрование осуществляется через скорые безнапорные фильтры, загруженные кварцевым песком.

Четвертый блок включает вторичное хлорирование и резервуар чистой воды. После фильтров вода, с введенным в нее хлором для обеззараживания, поступает в резервуар чистой воды. В резервуаре в результате длительного контакта (1,0–1,5 часа) хлора с водой происходит ее обеззараживание.

Первый блок в приведенной блок-схеме представляет собой смеситель, в который подаются все н

Качество воды на выходе из резервуара должно соответствовать нормативным требованиям, но не по всем показателям удается достичь этого результата. Связано это с тем, что нормативные требования по качеству воды при разработке существующих очистных сооружений значительно отличались от современных нормативных требований, и к тому же имеет место многолетнее изменение качества воды в источнике. В связи с тем, что проектом МФС не предусмотрены технологические процессы умягчения и обессоливания воды, качество питьевой воды по этим показателям практически соответствует качеству воды в источнике. В результате анализа качества воды в канале Северский Донец – Донбасс, приведенного ранее, выявлено, что жесткость значительную часть времени превышает нормативные значения, что не является допустимым. Все это говорит о том, что при разработке методики определения расчетных значений показателей качества воды необходимо принимать во внимание не только показатели, указанные на блок-схеме рис. 1, но и другие показатели, которые превышают нормативные значения для питьевой воды.

Далее для выбранных показателей качества необходимо рассчитать статистические параметры (табл. 1) и построить кривые дифференциального и интегрального распределения (рис. 2–7).

Таблица 1 – Результаты статистической обработки

Показатель	Мода	Среднее значение	Медиана	Минимум	Максимум	Дисперсия	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации	Асимметрия	Экссесс
Цветность, град	16	16,68	16	5	48	11,3	3,36	20,13	1,71	7,71
Мутность, мг/дм <sup>3</sup>	0,58	3,92	3,03	0,47	35,37	10,8	3,29	84,05	2,52	11,02
Жесткость, моль/дм <sup>3</sup>	6,7	7,09	7,1	5,4	9,3	0,6	0,76	10,75	0,18	-0,55
Перманганатная окисляемость, мг/дм <sup>3</sup>	6	6,16	6,1	4,0	9,9	0,5	0,73	11,93	0,96	2,79
ОМЧ при 37 °С	110	377	180	11	3 700	168 880	411	108,9	1,59	3,1
Коли-индекс	59	655	240	19	9 900	848 810	921	140,6	3,31	18,26

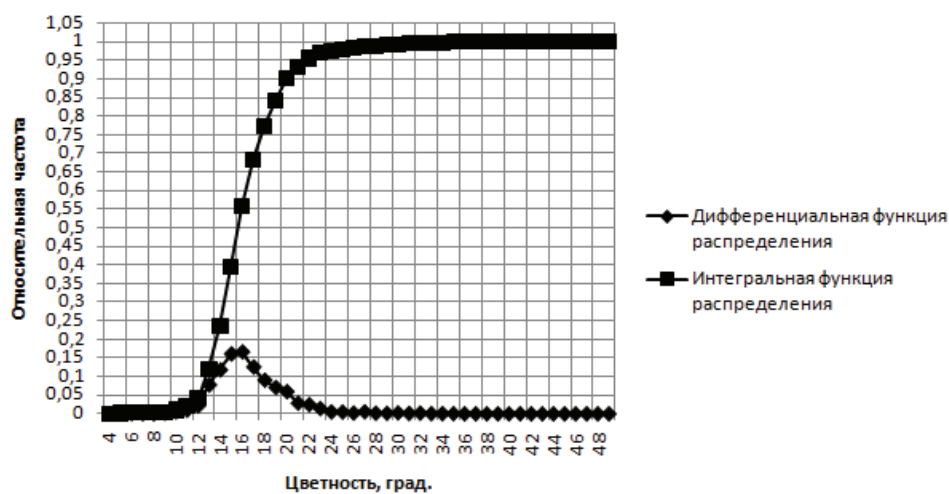


Рисунок 2 – Дифференциальная и интегральная функции распределения показателя цветность.

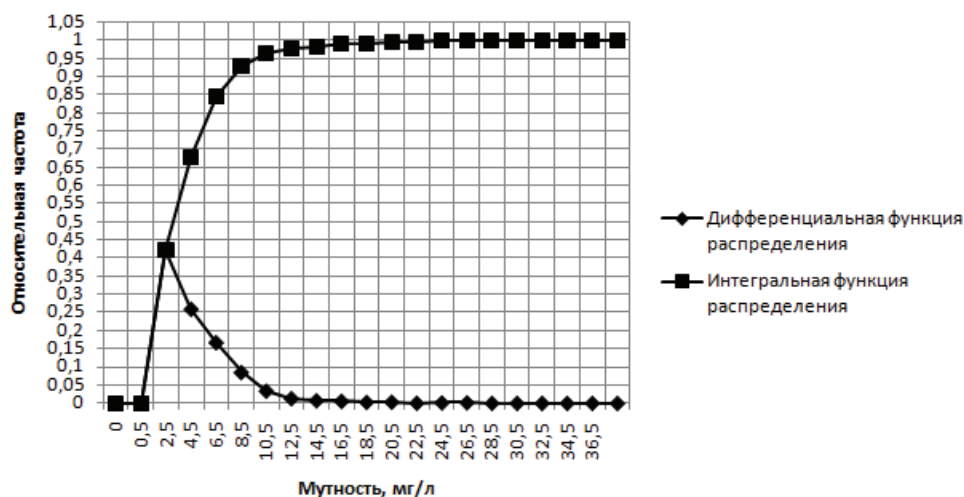


Рисунок 3 – Дифференциальная и интегральная функции распределения показателя мутность.

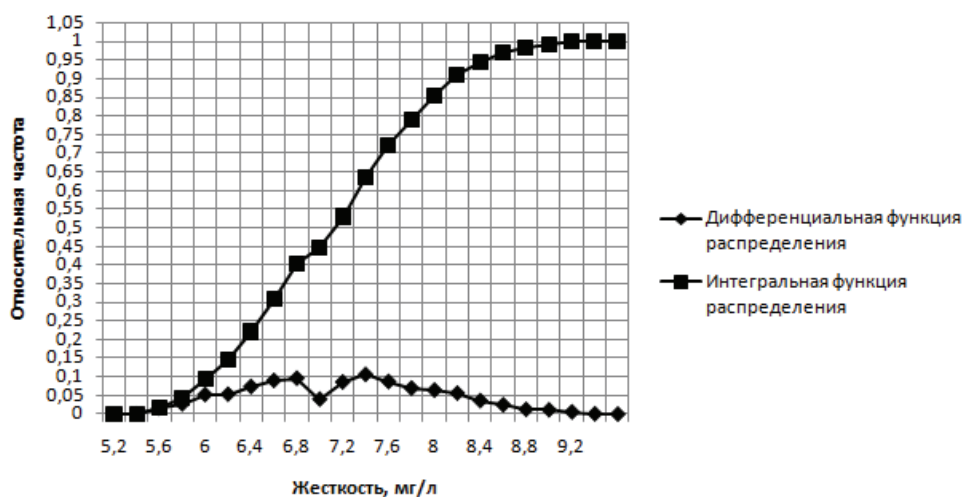


Рисунок 4 – Дифференциальная и интегральная функции распределения показателя жесткость.

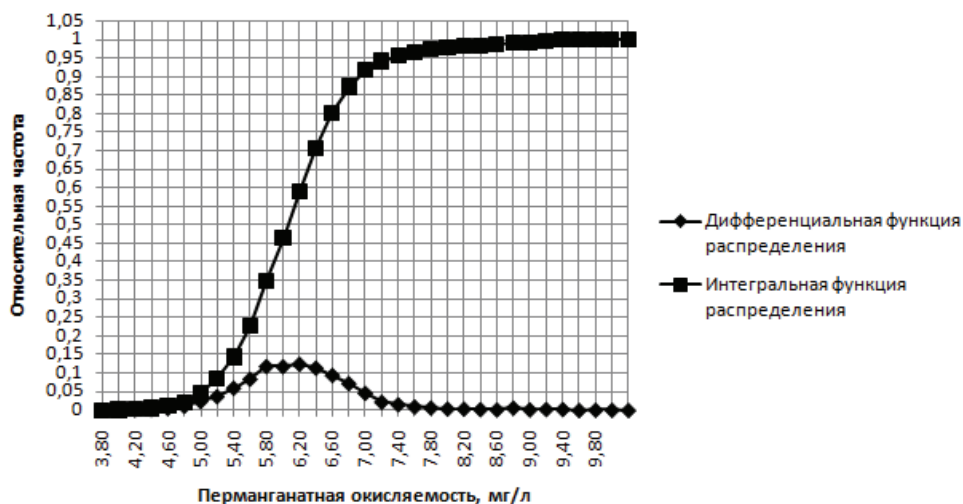


Рисунок 5 – Дифференциальная и интегральная функции распределения показателя перманганатная окисляемость.

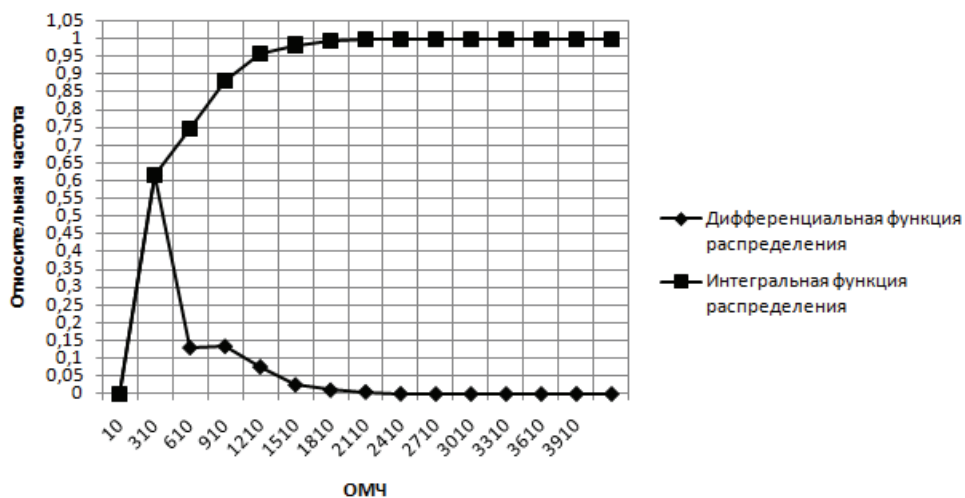


Рисунок 6 – Дифференциальная и интегральная функции распределения показателя ОМЧ.

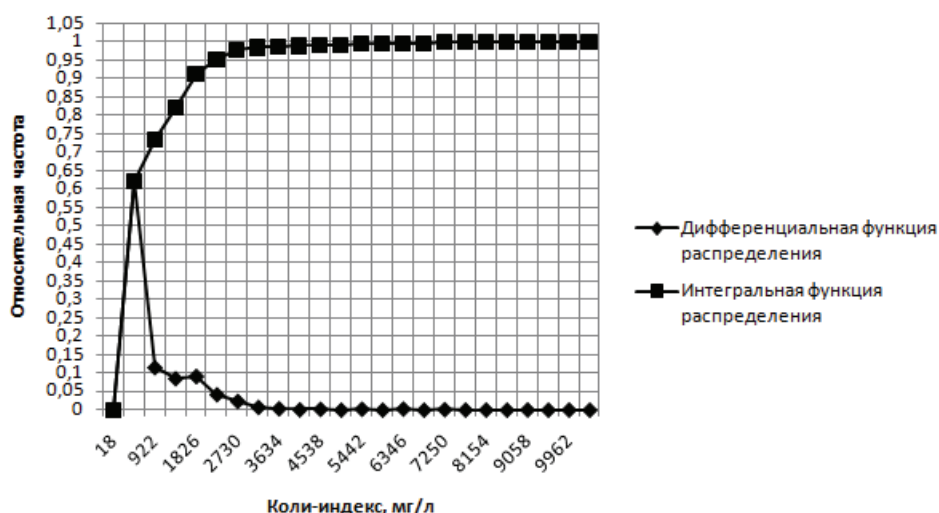


Рисунок 7 – Дифференциальная и интегральная функции распределения показателя коли-индекс.

Затем по построенным кривым интегрального распределения определяются расчетные значения каждого показателя с различными величинами обеспеченности, которые наиболее широко используются в науке и технике (табл. 2).

Таблица 2 – Расчетные значения показателей качества воды при различной величине обеспеченности

Показатель	Обеспеченность, %			
	15	10	5	1
Цветность, град	19,12	19,96	21,78	28,48
Мутность, мг/дм <sup>3</sup>	6,62	7,8	9,72	16,98
Жесткость, моль/дм <sup>3</sup>	7,99	8,16	8,44	8,94
Окисляемость, мг/дм <sup>3</sup>	6,74	6,92	7,30	8,74
ОМЧ при 37 °С	843	989	1 185	1 724
Коли-индекс	1 519	1 767	2 237	4 231

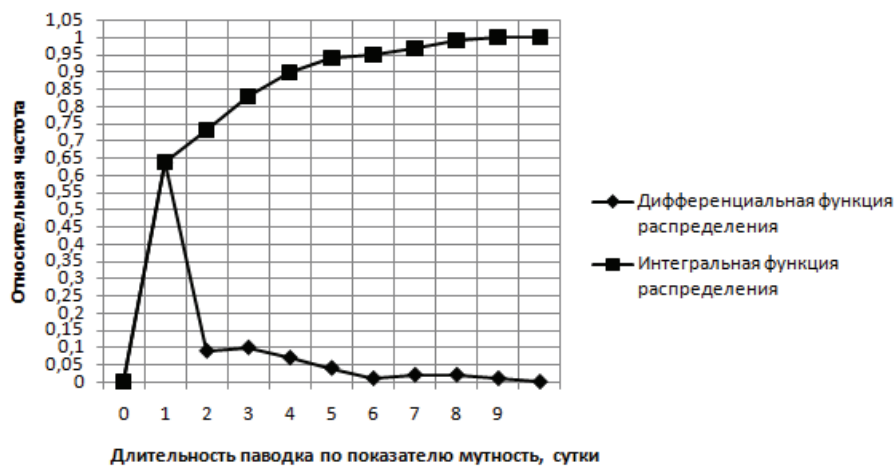
Из таблицы 2 видно, что чем больше величина обеспеченности, тем меньше расчетное значение показателя качества воды. И даже при обеспеченности 1 % полученные значения показателей качества воды, за исключением жесткости и окисляемости, практически в два раза меньше своих максимальных значений.

Если руководствоваться требованиями [1, 2, 5] по обеспеченности гидрологических характеристик при выборе водозаборов, то максимальные требования предъявляются при выборе максимального уровня воды в источнике. Здесь требуется обеспеченность 1 %, то есть выбранная величина показателя может быть превышена только один раз за сто лет наблюдений. В данном случае, если провести параллель между обеспеченностью гидрологических характеристик и обеспеченностью гидрохимических показателей, то допустимо в качестве расчетного значения выбрать величину обеспеченности 1 %.

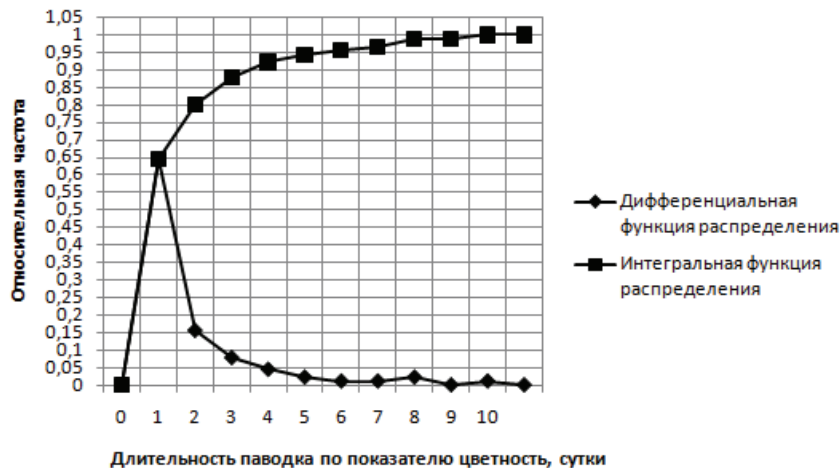
Если для выбора расчетного состава воды использовать предложенную методику, то в качестве расчетных значений будут выбраны значения меньше максимальных, что приведет к изменению состава очистных сооружений и снижению затрат на строительство и эксплуатацию водопроводных очистных сооружений. Однако возникает вопрос о поддержании санитарно-гигиенической надежности данных сооружений, так как возникает вероятность того, что выбранные сооружения могут не справиться с очисткой воды в случае превышения расчетных концентраций. При превышении показателем мутность воды расчетных величин сооружения будут работать с меньшей производительностью. При наличии одного источника водоснабжения это снижение не должно превышать 30 %.

Следует отметить, что наличие только одного источника водоснабжения не соответствует требованиям к надежности водопроводов I и II категорий [6]. При использовании двух источников водоснабжения водопроводные очистные станции могут проектироваться на обеспеченность показателей качества воды 5 % или даже 10 %.

Определенное значение имеет продолжительность стояния повышенных величин мутности и цветности воды (паводки). Обычно наблюдается не менее двух паводков в год, но кроме этого повышение мутности и цветности может происходить в результате сильных дождей и при цветении водоемов. В это время водопроводные очистные станции работают с повышенной нагрузкой. Для того чтоб определить расчетную продолжительность паводка, были подсчитаны продолжительности паводков (периодов повышенной мутности и цветности) за весь рассматриваемый период времени. Затем по полученным данным были построены гистограммы распределения продолжительности паводков по показателям мутность и цветность (рис. 8, 9).



**Рисунок 8** – Дифференциальная и интегральная функции распределения длительности паводков по показателю мутность.



**Рисунок 9** – Дифференциальная и интегральная функции распределения длительности паводков по показателю цветность.

По построенным кривым интегрального распределения определяются расчетные длительности паводков с различными величинами обеспеченности (табл. 3).

В результате можно задаться расчетной продолжительностью паводка для дальнейших расчетов. Так как необходимо постоянно поддерживать санитарно-гигиеническую надежность водопроводных очистных сооружений, то целесообразнее принимать длительность паводка с обеспеченностью 1 или 5 %.

**Таблица 3** – Расчетные длительности паводков (суток) при различной величине обеспеченности

Длительность паводка, сутки	Обеспеченность, %			
	15	10	5	1
По показателю мутность	3,3	4,0	6,0	8,0
По показателю цветность	2,7	3,5	5,5	8,05

Вода канала Северский Донец – Донбасс основную часть времени является маломутной и малоцветной [1], поэтому теоретически было бы достаточно одноступенчатого фильтрования на скорых фильтрах вместо существующей схемы очистки горизонтальные отстойники – скорые фильтры. Но в вышеописанные периоды стояния повышенных величин мутности и цветности производительность очистных сооружений с одноступенчатым фильтрованием и одним источником водоснабжения будет снижена.

Для того чтобы рассчитать, на сколько снизится производительность очистных сооружений, необходимо определить продолжительность работы скорых фильтров между промывками (фильтроцикл) при существующей двухступенчатой схеме и в случае использования только фильтров.

Фильтроцикл можно рассчитать, используя грязеемкость фильтрующей загрузки скорого фильтра [7], по формуле, ч:

$$T = \frac{G \cdot 1000}{V \cdot C_{\text{взв}}}, \quad (1)$$

где  $G$  – грязеемкость фильтрующей загрузки,  $\text{кг}/\text{м}^2$ , принимается по таблице 4;  
 $V$  – скорость фильтрования,  $\text{м}/\text{ч}$ , на МФС составляет 5,2;  
 $C_{\text{взв}}$  – мутность воды, поступающей на фильтры,  $\text{мг}/\text{дм}^3$ . Для расчета принимаются:  
– мутность обработанной реагентами и отстоенной воды – 10–15  $\text{мг}/\text{дм}^3$ ;  
– мутность коагулированной и неотстоенной воды – 80–100  $\text{мг}/\text{дм}^3$ .

**Таблица 4** – Расчетная грязеемкость фильтрующих загрузок [8]

Материал	Расчетная грязеемкость, $\text{кг}/\text{м}^2$	
	при фильтровании обработанной и отстоенной воды	при фильтровании коагулированной и неотстоенной воды
Кварцевый песок	1,25	1,5
Мраморная крошка	1,25	1,5
Дробленый антрацит	1,5	1,75

В результате расчетов продолжительности работы фильтров между промывками составили:

- при фильтровании обработанной реагентами и отстоенной воды – 16–24 часа;
- при фильтровании коагулированной и неотстоенной воды – 2,9–3,6 часа.

При использовании только скорых фильтров и при наличии одного источника водоснабжения всю расчетную продолжительность паводка производительность очистных сооружений будет снижена почти на 80 %. При наличии же минимум двух источников водоснабжения очистным сооружениям просто необходимо будет перейти на резервный источник водоснабжения на период паводка. Как было рассчитано ранее, расчетная продолжительность паводка для канала Северский Донец – Донбасс не превышает восьми дней.

## ВЫВОДЫ

Предложенная методика предполагает наличие данных многолетних наблюдений за качеством исходной воды, так как при отсутствии таковой информации значительно возрастают затраты из-за необходимости необоснованного применения дорогостоящих сооружений и технологий. Применение данной методики зависит от продолжительностей периодов стояния повышенных величин мутности и цветности воды, потому что в эти периоды водопроводные очистные сооружения будут работать с пониженной производительностью, а также от количества источников водоснабжения. При проектировании новых и реконструкции действующих очистных сооружений необходимо предусматривать несколько источников водоснабжения. В таком случае повысится надежность очистных сооружений, а технологическая схема очистки, исходя из качества поступающей воды, может

быть упрощена, что приведет к снижению расходов на их строительство, реконструкцию и эксплуатацию.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Строительные нормы и правила. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения [Текст] : СНиП 2.04.02-84\*. – Взамен СНиП П-31-74 ; введ. 1985-01-01. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 176 с.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Желтоухов, В. В. Надежность водозаборных сооружений: строительство и эксплуатация [Текст] / В. В. Желтоухов, С. Е. Богорад, Л. Ф. Петряшин. – К. : Будивельник, 1989. – 216 с. : ил. – 4 000 экз. – ISBN 5-7705-0200-2.
6. Найманов, А. Я. О надежности систем водоснабжения и водоотведения [Текст] / А. Я. Найманов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2005. – № 7. – С. 30–35. – ISSN 0321-4044.
7. Громогласов, А. А. Водоподготовка: Процессы и аппараты [Текст] : Учеб. пособие для вузов / А. А. Громогласов, А. С. Копылов, А. П. Пильчиков ; Под ред. О. И. Мартыновой. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 272 с. : ил. – 20 000 экз. – ISBN 5-283-00082-6.
8. Мещерский, Н. А. Эксплуатация водоподготовительных установок электростанций высокого давления [Текст] / Н. А. Мещерский. – 2-е изд. перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 408 с. : ил. – 6 000 экз.

Получено 14.09.2015

А. Я. НАЙМАНОВ, А. С. ТРЯКИНА

### ОБГРУНТУВАННЯ РОЗРАХУНКОВОГО СКЛАДУ ВОДИ ПРИ ВИБОРІ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ОЧИЩЕННЯ НА ПІДСТАВІ БАГАТОРІЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Донбаська національна академія будівництва і архітектури

У роботі подано математико-статистичне оброблення даних показників якості води, що впливають на підбір технологічної схеми очищення. Визначено розрахункові значення показників якості води та розрахункові тривалості стояння підвищених величин каламутності і кольоровості води при різних величинах забезпеченості. Виконано розрахунок зниження продуктивності очисних споруд з одноступінчастим фільтруванням у порівнянні зі стандартною двоступінчастою схемою очищення. Запропоновано методику визначення розрахункових показників якості води при виборі технологічної схеми очищення.

**показники якості води, водопровідні очисні споруди, технологічна схема очищення**

AUBEKIR NAIMANOV, ALYENA TRYAKINA

### JUSTIFICATION OF CALCULATED COMPOSITION OF THE WATER FOR THE SELECTION OF TECHNOLOGICAL SCHEME OF PURIFICATION ON THE BASIS LONG-TERM OBSERVATIONS

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

The paper presents a mathematical and statistical processing of data of water quality which affect the selection of technological scheme of purification. The calculated values of water quality and the calculated durations of standing of elevated values of turbidity and chromaticity of water at different values of provision have been determined. The calculation of the degradation of productivity of the water treatment plants with single filtration compared with the standard two-step purification scheme has been done. The method of determining the calculated values of indicators of water quality for the selection of technological scheme of purification has been suggested.

**water quality, water treatment plants, technological scheme of purification**

**Найманов Аубекір Ягопірович** – доктор технічних наук, професор кафедри міського будівництва та господарства Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: водопостачання, очищення води, методи підвищення надійності мереж водопостачання і каналізації.

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

**Найманов Аубекир Ягопирович** – доктор технических наук, профессор кафедры городского строительства и хозяйства Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: водоснабжение, очистка воды, методы повышения надежности сетей водоснабжения и канализации.

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

**Naimanov Aubekir** – D.Sc. (Eng.), Professor, Municipal Building and Economy Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: water supply, water purification, methods of increasing reliability of water and sewer nets.

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



УДК 628.16

**О. И. БАЛИНЧЕНКО**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## **УСТАНОВКИ ОБРАТНОГО ОСМОСА ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ДЕФИЦИТА ВОДЫ В ДОНБАССЕ**

В настоящее время по многим объективным причинам вода в Донбассе является дефицитом. Особенно страдают малые населенные пункты, которые используют подземные воды, соленые, жесткие, железистые. Эти воды часто пригодны только для некоторых технических целей. Для питья и питания котлов они категорически непригодны. Поэтому вопрос обратноосмотической обработки таких вод – привлекает к себе внимание. Для индивидуальных потребителей фирмами, далекими от науки, разработаны некоторые дорогостоящие агрегаты сомнительных технологий и неизвестных методик расчетов. Поэтому стоит задача навести порядок в этом плане для установок коллективного пользования с применением отечественных доступных конструкций. Тем более, что заграничный опыт делает сам метод все более доступным.

**обратноосмотическая установка, истинная селективность мембраны, рулонные фильтрующие элементы, пермиат**

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Водоснабжение малых населенных пунктов Донецкой области, как не обслуживаемых централизованной системой водоснабжения по причине экономической невыгодности, так и временно отрезанных от системы в результате военных действий, часто проводится из подземных источников. При этом во многих случаях вода не удовлетворяет установленным нормам относительно содержания в ней солей жесткости, хлоридов и сульфатов, марганца и железа. Содержание в воде суммарного количества солей свыше 1 г/л делает ее непригодной для питья и использования для большинства бытовых и производственных целей. В водоподготовке часто нужна обессоленная вода до 20 мг/л по ионам всех солей. Значительная часть сельских населенных пунктов и небольших промышленных предприятий в малых населенных пунктах имеют автономные системы водоснабжения с наличием водозаборных скважин, пневматических или насосных установок и водонапорных башен. Но качество воды таких систем редко удовлетворяет потребностям.

В наше время в отмеченных населенных пунктах остро встал вопрос подготовки воды, то есть, при необходимости, нужно удалять избыточные соли, кроме того, сероводород, свободную углекислоту и другие примеси. Такие очистные сооружения малой производительности должны быть компактными, достаточно дешевыми и простыми в эксплуатации.

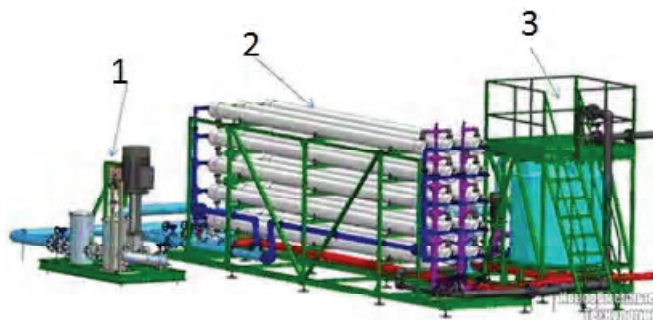
Для отмеченных условий одним из наиболее перспективных сооружений водоподготовки являются установки обратноосмотического типа, решающие все поставленные задачи, на которых нет необходимости использовать химические реагенты, усложняющие процесс общей очистки. Диапазон возможной очистки расширяется от 1 до 40 г/л по общему содержанию солей в исходной воде – и до почти полного обессоливания. Необходимые полезные для питьевой воды соли можно дозировать уже в обессоленный продукт (пермеат).

**Целью данной работы** стало усовершенствование технологии и технических средств обессоливания подземных вод на установках обратного осмоса, которые могут совмещаться с сооружениями водоснабжения малых населенных пунктов Донецкого региона.

## АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ (ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ)

### 1. Выбор объекта исследований и постановка задач

Первые большие установки опреснения морской воды на основе обратноосмотических мембранных элементов появились только в середине 70-х годов XX века. И лишь совсем недавно, в середине 90-х годов, внедрение мембранных методов очистки воды стало носить поистине массовый характер (рис. 1).



**Рисунок 1** – Функциональная схема установки обратного осмоса: 1 – блок предварительной очистки, 2 – блок мембранных модулей, 3 – блок промывки.

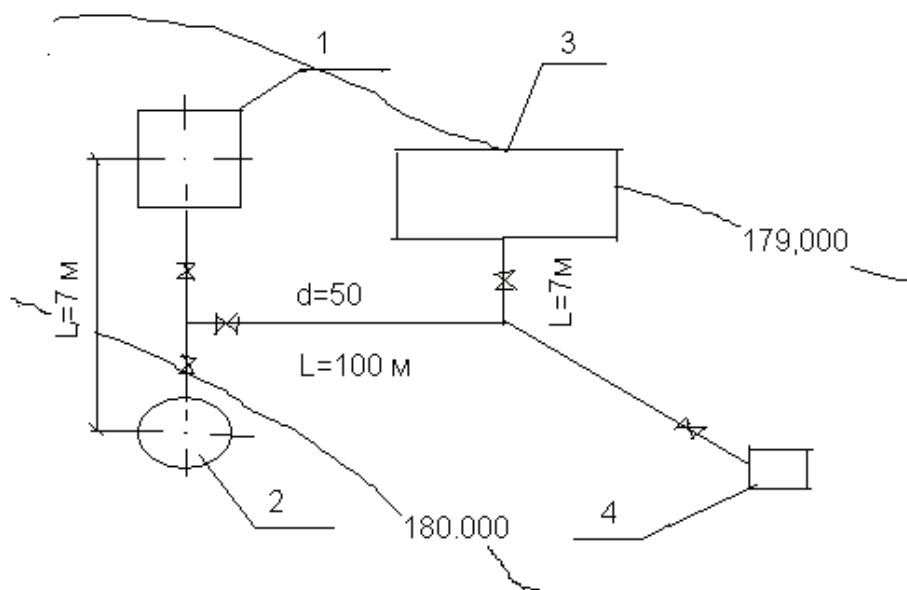
Для исследования была взята вода из водозаборной скважины, снабжающей часть села Георгиевка. Ионный состав этой воды типичен и для водопроводных скважин Донецкого региона. Эта вода используется жителями в качестве питьевой с доочисткой в домашних условиях на локальных обратноосмотических установках типа «Родничок» и т. п. с личным контролем только на вкус и цвет. Для котельных установок вообще нет подготовленной воды. Показатели физико-химического состава воды из скважины приведены в табл. 1.

**Таблица 1** – Показатели физико-химического состава воды из скважины с. Георгиевка

Наименование иона или другого показателя	Единица измерения	Количество	Норма по ГОСТу 2874-84 [3]
$J_{\text{о}}$	мг-экв/л	14	7
pH	–	7,16	6–9
Цветность	град.	20	20
Мутность	мг/л	15	1,5
Сухой остаток	мг/л	1 791	1 000
$\text{Cl}^-$	мг/л	600	350
$\text{SO}_4^{2-}$	мг/л	450	500
$\text{Fe}_{\text{общ}}$	мг/л	0,5	0,3
$\text{Cu}^{2+}$	мг/л	0,3	1
$\text{Mn}^{2+}$	мг/л	0,18	0,1
$\text{Al}^{3+}$	мг/л	0,09	0,5

Как видно из табл. 1, вода не соответствует питьевому качеству сразу по нескольким показателям, а именно; мутности – в 10 раз,  $J_{\text{о}}$  (общей жесткости) – в два раза, хлоридам – в 1,7 раз, сухому остатку – в 1,8 раз,  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  (общему железу) – в 1,4 раз, по  $\text{Mn}^{2+}$  (марганцу) – в 1,8 раз. Поэтому можно сделать вывод, главные предполагаемые процессы очистки – осветление и обессоливание данной воды. Расход ее составляет около  $10 \text{ м}^3 / \text{сут.}$  Вода остальных скважин близка по составу и производительности.

Схема водоснабжения представлена на рис. 2. Скважина работает в автоматическом режиме. Сеть водоснабжения – из чугунных напорных труб с диаметром условного прохода 50 мм составляет чуть более 100 м.

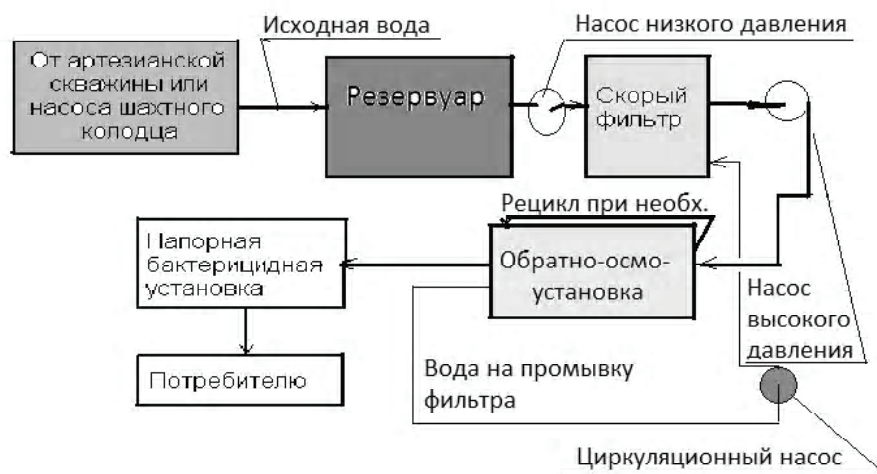


**Рисунок 2** – Схема водоснабжения из скважины объекта села Георгиевка: 1 – водозаборная артезианская скважина с производительностью около  $10 \text{ м}^3/\text{сут}$ ; 2 – насосная станция с пневматической автоматической установкой ВУ-5-30; 3 – двухэтажный 12-квартирный жилой дом; 4 – щитовая.

Вода солоновата на вкус, при кипячении либо отстаивании дает осадок карбоната кальция. Значительное количество сульфатов и хлоридов в исходной воде ( $\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^- \approx 20 \text{ мг-экв/л}$ , что  $\gg 5 \text{ мг-экв/л}$ , когда разрешается реагентное обессоливание) [2, прил. 8]. Таким образом, хлориды и сульфаты эффективно удаляются выбранным методом обратного осмоса. Некоторый избыток в воде железа и марганца, как правило, удаляется совместно с кальцием.

С осадками взвешенных веществ, карбоната кальция и ржавчины предназначен справиться скорый фильтр, запроектированный до основной – **обратноосмотической установки**, мембраны которой не работают при количестве взвешенных веществ более  $8 \text{ мг/л}$  (в данном случае –  $14 \text{ мг/л}$ ).

С учетом всех соображений и сооружений, схема водоочистки предлагается следующая (рис. 3). При этом учтена потребность потребителей в питьевой и обессоленной воде (для питания котлов котельной), целесообразно получать пермеат (конечный продукт), обессоленный до  $20 \text{ мг/л}$ . Для питья можно подавать его же, разбавив исходной водой до расчетных пропорций и добавив недостающих полезных солей, если потребуются. Расчетная производительность системы –  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ .



**Рисунок 3** – Схема водоснабжения с обработкой на обратноосмотической установке.

При разных вариантах схем водоснабжения малых населенных пунктов в системе обслуживания Донецкого региона, если давление в артезианской скважине достаточно высокое, то повысительный насос не нужен. Если в системе будет водонапорная башня – не нужна компрессорная установка, вместо компрессорной аэрации можно применить эжектор. Бактерицидная установка необходима для исключения возможности внесения загрязнений в питьевую воду.

Уточнение схемы и расчет параметров сооружений обезжелезивания воды последовало после лабораторных исследований.

Согласно исследованиям проф. С. П. Высоцкого [3], для Донецкого региона наиболее применимы обратноосмотические установки с плоскими рулонными мембранами с одно-трехступенчатым последовательным соединением модулей. Такие установки наиболее экономичны при высокой стоимости электроэнергии. При этом рекомендуется соблюдать принцип уменьшения площади мембран по ходу воды. Давление воды также падает, по ходу воды преодолевая сопротивление мембран. Это обеспечивает постоянство удельного давления воды на мембраны и продлевает срок их службы.

Отсюда обратноосмотическая установка запроектирована по следующей схеме (рис. 4).



Рисунок 4 – Схема предложенной обратно-осмотической установки.

## 2. РАСЧЕТ ОБРАТНООСМОТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

### 2.1 Расчет степени разбавления раствора солей

Исходное содержание солей в воде  $\approx 1,8$  мг/л, а конечная концентрация обессоленной воды по требованиям потребителя – 20 мг/л, следовательно, степень разбавления  $n_p = 1\,800 / 20 = 90$ . Считаем приблизительно, что вся оставшаяся в пермеате соль – NaCl – 20 мг/л.

### 2.2 Выбор расчетного давления и температуры

С учетом рекомендаций проф. С. П. Высоцкого, оптимальное сочетание срока службы и давления на мембрану для современных моделей плоских рулонных мембран: температура 20–25 °С (выбираем верхний предел – 25 °С) и давление 5–6 МПа (выбираем нижний предел 5 МПа).

Таким образом, выбираем  $t = 25$  °С,  $\Delta P = 5$  МПа.

### 2.3 Выбор мембраны

При выборе мембраны следует исходить из того, что она должна обладать максимальной удельной производительностью при селективности, обеспечивающей выполнение требований к качеству пермеата (соответствие санитарным нормам или нормам на техническую воду, допустимым потерям растворенного вещества и т. п.). Кроме того, мембрана должна обладать высокой химической стойкостью по отношению к разделяемым веществам.

При работе в нейтральных растворах, в том числе воде, наибольшее распространение получили ацетатцеллюлозные мембраны, которые характеризуются хорошими разделительными свойствами, но не являются химически стойкими в щелочных и сильноокислых средах (рабочий диапазон  $3 < \text{pH} < 8$ ). Поскольку раствор  $\text{NaCl}_2$ , от которого, главным образом, будем избавляться, в концентрации 600 мг/л мало концентрирован, по химической классификации, и  $\text{pH} = 7,16$  – укладываются в требуемый диапазон, последующий выбор проведем из ацетатцеллюлозных мембран.

Предварительно сделан подбор мембраны по истинной селективности  $\phi_{\text{и}}$ , от которой затем следует перейти к наблюдаемой  $\phi$  с учетом концентрационной поляризации в реальных мембранных аппаратах [4].

Истинная селективность  $\varphi_H = (x_3 - x_2)/x_3$ , а наблюдаемая  $\varphi = (x_1 - x_2)/x_1$ ,  $x_2, x_3$  – концентрация соли в произвольном сечении аппарата соответственно в объеме разделяемого раствора, в пермеате и у поверхности мембраны со стороны разделяемого раствора).

Истинную селективность мембран по отношению к сильным электролитам (в данном случае, к ионам  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Ca}^{2+}$ ) можно рассчитать по формуле:

$$\lg(1 - \varphi_H) = a - b \cdot \lg(\Delta H_{Cl} / Z_M),$$

где  $a$  и  $b$  – константы для данной мембраны при определенном давлении и температуре;  
 $\Delta H_{Cl}$  – среднее геометрическое значение теплот гидратации ионов, образующих соль;  
 $Z_M$  – валентность иона с меньшей теплотой гидратации. Формула с высокой точностью применима в диапазоне концентраций от  $2 \cdot 10^{-4}$  до  $2 \cdot 10^{-1}$  моль/л и приближенно – до концентрации  $4 \cdot 10^{-1}$  моль/л. В нашем случае концентрация хлорида 600 мг/л, то есть хлорид-иона –  $10,2 \cdot 10^{-3}$  моль на литр, то есть формула может быть использована.

В табл. 2 представлены характеристики ацетат-целлюлозных мембран для обратного осмоса, выпускаемых в России (характеристики установлены при перепаде рабочего давления через мембрану  $\Delta P = 5$  МПа и рабочей температуре  $t = 25$  °С, что соответствует выбранным рабочим параметрам; в качестве удельной производительности по воде указаны средние значения за длительный период эксплуатации; значения констант  $a$  и  $b$  отвечают размерности  $\Delta H$  в кДж/моль).

**Таблица 2** – Представлены характеристики ацетатцеллюлозных мембран для обратного осмоса

Марка мембраны	Удельная производительность по воде $G_0 = 10^{-3}$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с)	Константы уравнения	
		$a$	$b$
МГА-100	1,4	6,70	3,215
МГА-95	2,3	3,47	1,844
МГА-90	3,0	2,67	1,420
МГА-80	4,9	1,00	0,625

Значения теплот гидратации ионов, необходимые для расчета, приведены в [5].

Для рассматриваемого случая  $\Delta H_{Ca} = 1\,616$ , кДж/моль;  $\Delta H_{Cl} = 352$ , кДж/моль,  $Z_M = Z_{Cl} = 1$ .

Тогда по расчетам  $\varphi_H = 0,933$ .

Аналогичным образом определим истинную селективность для остальных мембран в табл. 2.

Выбираем для дальнейших расчетов мембрану МГА-90, имеющую селективность по NaCl  $\varphi_H = 0,945$  и удельную производительность по воде  $G_0 = 3 \cdot 10^{-3}$  кг/(м<sup>2</sup>·с).

Далее был сделан приближенный расчет поверхности мембраны. Ориентируясь на российскую аппаратуру, выбран аппарат рулонного типа. Среди них наиболее перспективны аппараты, каждый модуль которых состоит из нескольких совместно навитых рулонных фильтрующих элементов (РФЭ). Такая конструкция позволяет уменьшить гидравлическое сопротивление дренажа потоку пермеата благодаря тому, что путь, проходимый пермеатом в дренаже, обратно пропорционален числу навитых рулонных фильтрующих элементов.

#### 2.4 Конструирование аппарата

Ориентируясь на российскую серийную аппаратуру, выбраны аппараты с рулонными фильтрующими элементами типа ЭРО-Э-6,5/900. Общее число аппаратов в мембранной установке по расчету составило 100, число секций – 14. Окончательное распределение числа аппаратов по секциям получилось следующим.

**Таблица 3** – Распределение числа аппаратов по секциям

Секция	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Число в секции	17	13	11	10	9	7	6	6	5	4	4	3	3	2

Схема соединений дана на рис. 5. Уточненный расчет фактической поверхности мембраны подтвердил правильность выбора.

Для продавливания раствора через мембранные поверхности потребовался высоконапорный насос типа ПТ1-2,5/125Д1 в количестве двух, включенных параллельно.

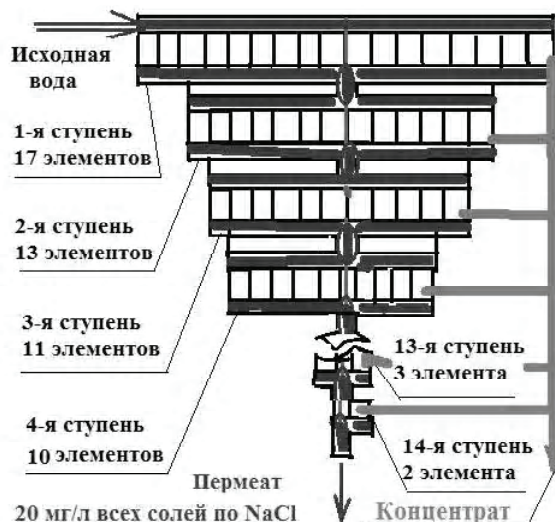


Рисунок 5 – Схема соединения элементов и секций принятой обратноосмотической установки.

Себестоимость обработки воды на запроектированной установке с учетом всего комплекса сооружений рассчитана с привлечением технико-экономические показатели подобных европейских обратно осмотических установок [3]. Ориентировочное значение себестоимость очищенной воды (до 2 мг остаточного общего солесодержания) – 41,9 грн. / м<sup>3</sup>, в ценах на 1 янв. 2014 г.

### ВЫВОДЫ

1. В наше время в малых населенных пунктах Донецкого региона остро встал вопрос получения питьевой и подготовленной воды, Дана характеристика одного из водопроводов, конкретно – села Георгиевка, производительностью 5 м<sup>3</sup>/ч и 10 м<sup>3</sup>/сут. Вода отличается значительным общим солесодержанием – около 1 800 г/м<sup>3</sup> при наличии хлоридов и сульфатов около 20 мг-экв/л. Источник – подземная скважина.

2. В результате изучения литературных источников для заданного объекта был выбран метод осмотического обессоливания воды. Расчетная исходная концентрация – 1 800 г/м<sup>3</sup> солей – принята по хлоридам равной общему солесодержанию, конечная (пермиата) – 20 мг/л – тоже по хлоридам.

3. Рабочим органом промышленной установки выбрана ацетатцеллюлозная мембрана МГА-90, имеющая истинную селективность по  $\phi_{\text{и}} = 0,945$  и удельную производительность по воде  $G_0 = 3 \cdot 10^{-3}$  кг/(м<sup>2</sup>·с). Она производится в Тамбове.

4. По результатам расчетов был выбран аппарат с рифлеными фильтрующими элементами типа ЭРО-Э-6,5/900, выпускаемый серийно российской промышленностью со 100 рулонными элементами, объединенными в 14 секций. Установка может обессолить воду с концентрацией солей до 5 г/л – практически полностью.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теоретические основы очистки воды [Текст] : учебное пособие для вузов / Н. И. Куликов, А. Я. Найманов, Н. П. Омельченко, В. Н. Чернышев ; Донбас. нац. акад. стр-ва и архитектуры. – Донецк : Ноулидж, Донецкое отделение, 2009. – 298 с. – ISBN 978-966-1571-22-7.
2. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения [Текст] : СНиП 2.04.0–84. – [Действует с 1085–0.1–01]. – М. : Стройиздат, 1985. – 136 с.
3. Высоцкий, С. П. Очистка, кондиционирование и использование вод повышенной минерализации [Текст] : Монография / С. П. Высоцкий, С. Е. Гулько. – Донецк : Каштан, 2014. – 316 с.
4. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов [Текст] / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – Л. : Химия, 1976. – 552 с.
5. Баромембранные процессы и аппараты [Текст] : учебное пособие / Под ред. Г. И. Николаева. – Улан-Удэ : Изд-во ВСГТУ, 2007. – 290 с.

6. Дытнерский, Ю. И. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст] : пособие по проектированию / Ю. И. Дытнерский. – М. : Химия, 1991. – 496 с.

Получено 18.09.2015

О. Й. БАЛІНЧЕНКО

УСТАНОВКИ ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ДЕФІЦИТУ ВОДИ В ДОНБАСІ

Донбаська національна академія будівництва і архітектури

На даний час з багатьох об'єктивних причин вода в Донбасі є дефіцитом. Особливо страждають малі населені пункти, які використовують підземні води, солоні, жорсткі, залізисті. Ці води часто придатні тільки для деяких технічних цілей. Для пиття і живлення казанів вони категорично непридатні. Тому питання оберненоосмотичного оброблення таких вод привертає до себе увагу. Для індивідуальних споживачів фірмами, далекими від науки, розроблені деякі дорогі агрегати сумнівних технологій і невідомих методик розрахунків. Тому стоїть задача навести лад в цьому плані для установок колективного користування, із застосуванням вітчизняних доступних конструкцій. Тим паче, що зарубіжний досвід робить сам метод все більш доступним.

**зворотноосмотична установка, істинна селективність мембрани, рулонні фільтруючі елементи, перміат**

OXANA BALINCHENKO

OPTIONS OF REVERSE OSMOSE FOR DIMINISHMENT OF DEFICIT OF WATER IN DONBASS

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Presently on many objective reasons, water in Donbas is a deficit. Small settlements which use underground water especially suffer, salt, hard, ferrous. These the water often suitable only for some technical aims. For to be drunk and the feeds of caldrons they are categorically useless. Therefore question of back-osmotic treatment of such waters – comes to itself into notice. For individual users by firms distant from science, some expensive aggregates of doubtful technologies and unknown methods of calculations are developed. A task to put in order in this plan for options of the collective use stands therefore, with the use of domestic accessible constructions. Especially as oversea experience opens up a method more.

**back-osmotic setting, veritable selectivity of membrane, roll filtering elements, permeate**

**Балінченко Оксана Йосипівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри водопостачання, водовідведення і охорони водних ресурсів Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: корозія і захист водопроводів, захист трубопроводів від накипу.

**Балинченко Оксана Иосифовна** – кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: коррозия и защита водопроводов, защита трубопроводов от накипи.

**Balynchenko Oхana** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Water Supply, Water Disposal and Water Resources Conservation and Protection Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: corrosion and defense of plumbing's, defense of pipelines from scum, electrochemical methods of water treatment.



УДК 628.543:628.16.08

**С. П. ВЫСОЦКИЙ, Т. И. СТЕПАНЕНКО**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## ОСАЖДЕНИЕ МЕТАЛЛОВ ИЗ СТОЧНЫХ ВОД

В сточных водах металлургических, коксохимических, горнодобывающих предприятий содержатся ионы тяжелых металлов. Опасными с точки зрения влияния на здоровье населения являются ионы алюминия, железа, никеля, меди. В статье исследовано влияние pH раствора на растворимость тяжелых металлов. Обоснована необходимость ступенчатого осаждения металлов из сточных вод. Определены характеристики осаждения соединений железа из растворов в зависимости от концентрации кислоты и температуры раствора. Приведены аналитические зависимости, характеризующие влияние указанных факторов на процесс обработки сточных вод.

**тяжелые металлы, реагентный метод, сточные воды, известь, едкий натр**

### ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Тяжелые металлы являются загрязнителем сточных вод особенно в техногенных регионах. Загрязнение поверхностных вод стоками металлургических, коксохимических, горнодобывающих предприятий создает сложную экологическую обстановку в регионе. Тяжелые металлы относятся к одним из наиболее опасных для здоровья человека и других биологических систем соединений. Токсическое действие тяжелых металлов на живые организмы проявляются в виде изменений функционирования центральной и периферической нервной системы, внутренней секреции, системы кроветворения [1, 2].

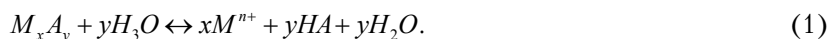
### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В настоящее время обработка сточных вод осуществляется практически только с целью регулирования pH до нормируемых значений без учета необходимости удаления из сточных вод тяжелых металлов.

**Целью работы** является определение влияния pH на растворимость тяжелых металлов в воде, а также влияния температуры и концентрации кислоты в сточных водах на степень и скорость осаждения соединений железа.

### ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

В общем виде содержание тяжелых металлов в водных растворах зависит от активности водородных ионов (pH) раствора, константы диссоциации кислоты, полученной при гидролизе солей и произведения растворимости (ПР) осадка [3, 4]. Растворимость металла для равновесия:



Описывается уравнением (2):

$$P = \sqrt{\frac{ПР_{M_x A_y} \cdot [H_3O]^{2y}}{K_{H_3O}^y \cdot \left(\frac{y}{x}\right)^y}}. \quad (2)$$

Из формулы 1 следует, что содержание металла в растворе определяется относительно сложной зависимостью. Для значений  $K_{HA}$  не намного меньше ПР осадка, последний хорошо растворяется в кислотах (например, карбонаты, оксалаты и др.). В тех случаях когда ПР намного меньше  $K_{HA}$ , то растворимость осадков и, соответственно, содержание металла в растворе мало даже в растворах с высокой активностью водородных ионов.



Критическая или оптимальная величина активности водородных ионов (рН) очень важна, так как даже незначительное изменение величины рН приводит к довольно большому изменению содержания металла в растворе [5]. При изменении гидратной щелочности воды в пределах нормируемых величин от 0 до 0,3 мг-экв/л равновесное содержание железа изменяется в 25–30 раз. На рис. 1 показано влияние рН на равновесное содержание металла [6].

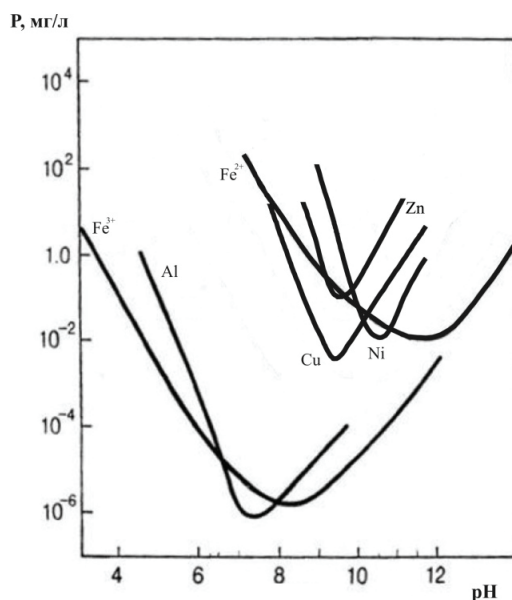


Рисунок 1 – Зависимость растворимости металлов от показателя рН.

Приведенные на рис. 1, 2 данные показывают, что диапазоны оптимальных значений рН для удаления тяжелых металлов существенно отличаются. Учитывая то, что при повышении рН гидроксиды металлов могут снова переходить в растворенное состояние, возникает необходимость ступенчатого осаждения металлов.

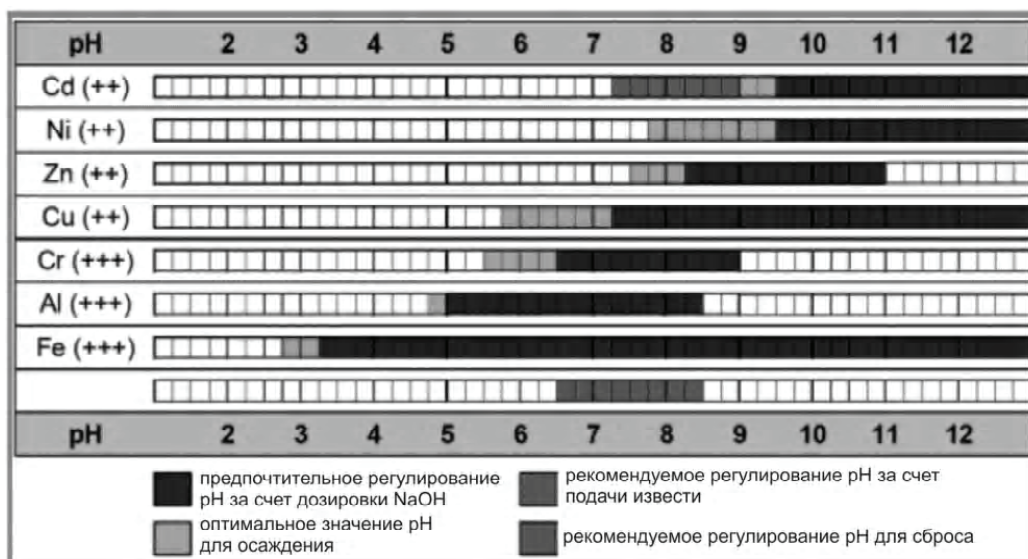


Рисунок 2 – Диапазон значений рН для осаждения металлов с использованием едкого натра.

Несмотря на то, что некоторые металлы, такие как свинец, марганец и серебро, не могут быть эффективно удалены за счет осаждения в виде гидроксидов, использование осаждения в виде гидроокисей является достаточно хорошо опробованной и простой технологией, которая позволяет достигнуть пределов допустимых концентраций для некоторых металлов. Кроме того, этот метод очень удобен для автоматизации процесса. Осаждение в виде гидроксидов металлов достигается за счет

гидроокисей NaOH или  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Осаждение в виде гидроокисей с использованием указанных реагентов позволяет достичь близких результатов. Однако дозирование едкого натра обеспечивает более точное регулирование pH.

Наиболее предпочтительным реагентом при очистке сточных вод является известь. Это обусловлено ее низкой стоимостью, доступностью, удобством хранения и экологической чистотой реагента. Под экологической чистотой принимаем во внимание загрязнение окружающей среды при изготовлении реагента. Технический едкий натр поступает на водоподготовительные установки обычно в виде 42%-го раствора. Несмотря на удобство его дозирования, существуют сложности его хранения в условиях низких температур [7].

Для «доводки» содержания металлов до более низких значений может использоваться обработка стоков с использованием сульфидов натрия. Несмотря на повышение стоимости обработки, сульфид натрия осаждает остаточное содержание металлов после удаления соединений в виде гидроксидов. Расход этого реагента незначителен.

В табл. 1 приведены теоретические значения растворимости отдельных металлов в чистой воде [7].

**Таблица 1** – Теоретические значения растворимости некоторых металлов в чистой воде

Металл	Остаточное содержание после осаждения в виде		
	Гидроксидов, мг/л	Сульфидов, мг/л	Карбонатов, мг/л
$\text{Cd}^{2+}$	$2,3 \times 10^{-3}$	$6,7 \times 10^{-10}$	$1,0 \times 10^{-4}$
$\text{Cr}^{3+}$	$8,4 \times 10^{-4}$	не осаждается	–
$\text{Co}^{2+}$	$2,2 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^{-8}$	–
$\text{Cu}^{2+}$	$2,2 \times 10^{-2}$	$5,8 \times 10^{-18}$	–
$\text{Fe}^{2+}$	$8,9 \times 10^{-1}$	$3,4 \times 10^{-5}$	–
$\text{Pb}^{2+}$	2,1	$3,8 \times 10^{-9}$	$7,0 \times 10^{-3}$
$\text{Ni}^{2+}$	$6,9 \times 10^{-3}$	$6,9 \times 10^{-8}$	$1,9 \times 10^{-1}$
$\text{Ag}^+$	13,3	$7,4 \times 10^{-12}$	$2,1 \times 10^{-1}$
$\text{Zn}^{2+}$	1,1	$2,3 \times 10^{-7}$	$7,0 \times 10^{-4}$

Относительно большая трудоемкость по определению равновесного содержания металлов в зависимости от pH показывает на целесообразность аналитического решения указанной задачи. При этом важным с практической точки зрения является определение более точного влияния изменения pH вблизи области оптимальных значений этого показателя. Для отдельных металлов оптимальные значения показателя pH, при которых имеет место минимальное равновесное содержание этих металлов, изменяются в очень широких пределах от  $\approx 7$  для алюминия до 11,2 для кадмия и 11,7 для двухвалентного железа (рис. 1). Таким образом, активность ионов водорода при этом изменяется более чем в 50 тыс. раз. Если для отдельных металлов среда в растворе является достаточно кислой для нахождения металла в виде моноиона, то для других этот уровень pH соответствует образованию в растворе соответствующих гидроксильных комплексов.

Обработка полученных авторами, а также из литературных источников [8, 9], экспериментальных данных показала, что зависимость с высокой степенью корреляции (коэффициент регрессии на уровне 0,95–0,99) описывается следующим уравнением, полученным авторами (рис. 3):

$$\lg \frac{C}{C_0} = a(\text{pH} - \text{pH}_{\text{opt}})^2 + b = a(\Delta \text{pH})^2 + b, \quad (3)$$

где  $C$ ,  $C_0$  – соответственно, текущее значение равновесной концентрации металла и минимальное значение при оптимальном уровне pH, моль/л;

$\text{pH}$ ,  $\text{pH}_{\text{opt}}$  – соответственно, текущее и оптимальное значение pH;

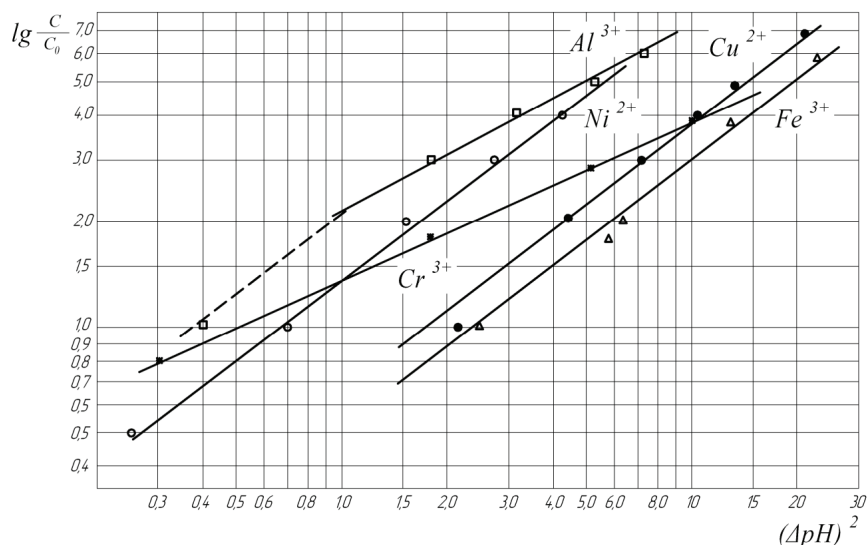
$\Delta \text{pH}$  – разница текущего и оптимального значений pH.

При этом для соединений железа ( $\text{Fe}^{3+}$ ):

$$\lg \frac{C}{C_0} = 0,52(\Delta \text{pH})^{1,5}, \quad (4)$$

для соединений меди ( $\text{Cu}^{2+}$ ):

$$\lg \frac{C}{C_0} = 0,66(\Delta \text{pH})^{1,5}, \quad (5)$$



**Рисунок 3** – Зависимость показателя, характеризующего растворимость металлов от разницы текущего и оптимального значений pH.

для соединений никеля ( $\text{Ni}^{2+}$ ):

$$\lg \frac{C}{C_0} = 1,33(\Delta pH)^{1,5}, \quad (6)$$

для соединений алюминия ( $\text{Al}^{3+}$ ):

$$\lg \frac{C}{C_0} = 2,13(\Delta pH)^{1,04}. \quad (7)$$

Нетрудно убедиться, что разница уровней pH соответствует определенной активности водородных ионов. Значения  $C_0$  для отдельных металлов следующие:  $\text{Al}^{3+} = 8,91 \cdot 10^{-7}$ ;  $\text{Fe}^{3+} = 1,51 \cdot 10^{-6}$ ;  $\text{Cu}^{2+} = 1 \cdot 10^{-3}$ ;  $\text{Ni}^{2+} = 1 \cdot 10^{-3}$  моль/л. Отличие характера прямых для алюминия и хрома обусловлено более высокими амфотерными свойствами этих металлов.

Основными методами очистки являются нейтрализация стоков и их отстаивание [10, 11]. На процесс очистки влияют активность водородных ионов, температура раствора и время осаждения. Согласно предложенной авторами модели процесс осветления описывается показательной функцией величины обратной времени осаждения:

$$\frac{1-\alpha}{\alpha} = K \cdot \frac{1}{\tau} + b, \quad (8)$$

где  $\alpha$  – степень осаждения загрязнителя, долей.

Показатель  $1-\alpha/\alpha$  характеризует «концентрационный напор» загрязнителя. На рис. 4 показана зависимость указанного показателя при изменении в качестве параметра концентрации кислоты 0,01 моль/л, 0,02 и 0,04 моль/л (соответственно, 10, 20 и 40 мг-экв/л соляной кислоты).

Влияние концентрации раствора и времени осаждения на показатель, характеризующий степень осаждения соединений железа, описывается следующей аналитической зависимостью:

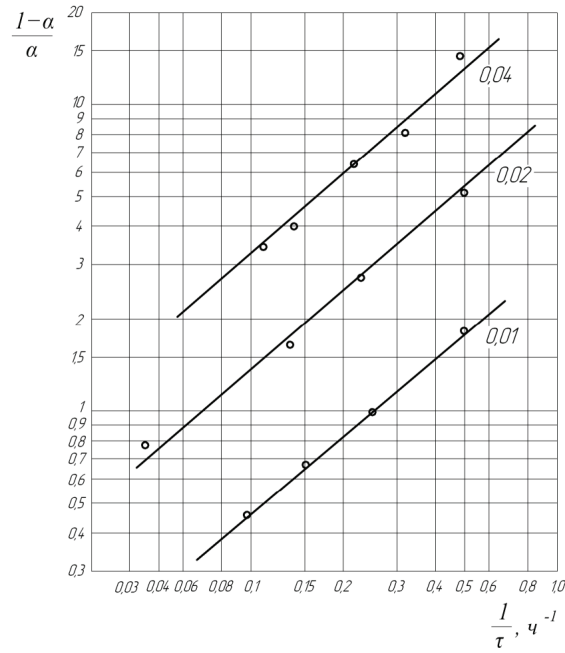
$$\frac{1-\alpha}{\alpha} = 3,165 \cdot 10^3 \left( \frac{1}{\tau} \right)^{0,86} \cdot C^{1,50}, \quad (9)$$

где  $\alpha$  – время осаждения, ч;

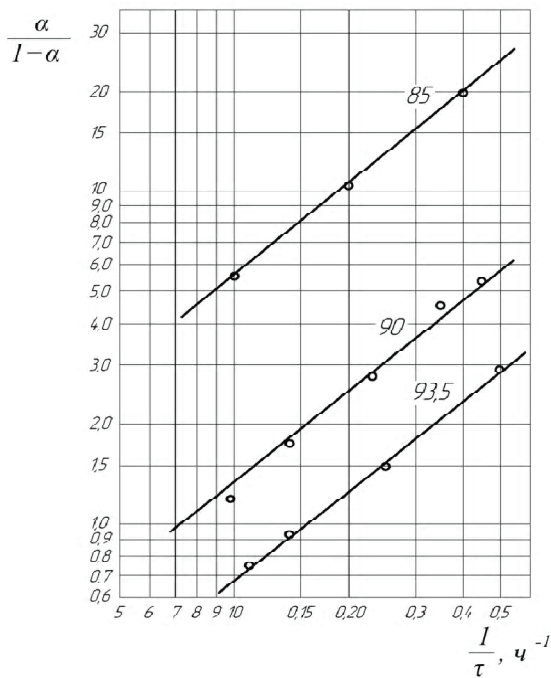
$C$  – концентрация кислоты, моль/л.

Влияние времени на изменение параметра  $\alpha/1-\alpha$  при разной температуре процесса показано на рис. 5. Эта зависимость со степенью корреляции  $\geq 0,97$  также описывается показательной функцией величины, обратной времени процесса. Показатель «В», учитывающий влияние температуры традиционно для химических процессов является экспоненциальной функцией величины обратной абсолютной температуры процесса (рис. 6).

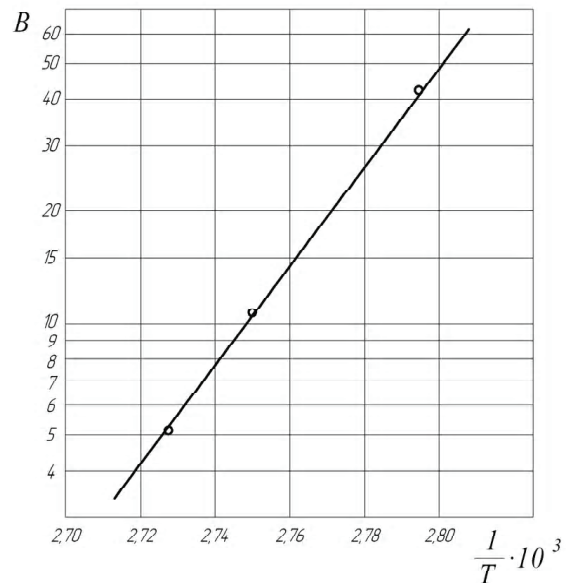
Влияние температуры раствора и времени осаждения на показатель, характеризующий степень осаждения соединений железа, описывается следующей зависимостью:



**Рисунок 4** – Зависимость параметра, характеризующего степень осаждения взвешенных веществ от величины, обратной времени процесса (цифры на прямых соответствуют концентрации (активности) водородных ионов, моль/л).



**Рисунок 5** – Зависимость параметра, характеризующего степень осаждения взвешенных частиц от величины, обратной времени процесса (цифры на кривых соответствуют температуре раствора в °C).



**Рисунок 6** – Зависимость показателя «В» от параметра  $1/T$ , обратной абсолютной температуры.

$$\frac{1-\alpha}{\alpha} = 2,04 \cdot 10^{-36} \exp\left(3,073 \cdot 10^4 \frac{1}{T}\right) \cdot \left(\frac{1}{\tau}\right)^{0,86}. \quad (10)$$

## ВЫВОДЫ

1. Исследовано влияние pH на растворимость тяжелых металлов в воде и получены аналитические зависимости для растворимости отдельных металлов.
2. Обоснована необходимость ступенчатого осаждения металлов из сточных вод.
3. Для глубокой очистки сточных вод от соединений тяжелых металлов предпочтительно использовать ступенчатое осаждение металлов сначала в виде гидроокисей, а затем в виде сульфидов.
4. Определены условия осаждения соединений железа в зависимости от концентрации кислоты в растворе и его температуры.
5. Выведены аналитические зависимости, характеризующие процесс осаждения соединений железа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vrijheid, M. Hazard potential ranking of hazardous waste sites and risk of congenital anomalies [Текст] / M. Vrijheid, H. Dolk, B. Armstrong // Occupational Environmental Medicine. – 2002. – № 59(II). – P. 768–776.
2. Аверин, Г. В. Опасность и риск как характеристики особых состояний экологических и техногенных систем [Текст] / Г. В. Аверин, А. В. Звягинцева // Экологічна безпека. – 2008. – № 2. – С. 22–30.
3. Лурье, Ю. Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод [Текст] / Ю. Ю. Лурье. – М.: Химия, 1984. – 464 с.
4. Пилипенко, А. Т. Аналитическая химия [Текст]. Т. 1 / А. Т. Пилипенко, И. В. Пятницкий. – М.: Химия, 1990. – 480 с.
5. Wällstedt, Teresia. Influence of acidification and liming on metals in lake sediments [Текст] : Doctoral Thesis in Applied Environmental Science / Teresia Wällstedt. – Stockholm : Stockholm's University, 2005. – 30 p.
6. Aube, Bernard. The Science of Treating Acid Mine Drainage and Smelter Effluents [Электронный ресурс] / Bernard Aube. – Québec, Canada : [s. n.], 2004. – 21 p. – Режим доступа : <http://www.infomine.com/publications/docs/Aube.pdf>.
7. Techno-economical comparison of conventional hydroxide precipitation and electrocoagulation for heavy metal removal from industrial wastewater [Текст] / J. Rodriguez, M. Schweda, S. Stopic, B. Friedrich // Metall : Fachzeitschrift für Metallurgie; Technik, Wissenschaft, Wirtschaft. – Clausthal-Zellerfeld : GDMB-Informationsges. – 2007. – Vol. 61, 4. – P. 208–214.
8. Peters, Robert W. Separation of heavy metals: Removal from industrial wastewater and contaminated soil [Электронный ресурс] / Robert W. Peters and Linda Shem // International conference on emerging separation technologies for metals and fuels, Palm Coast, FL (United States), 13–28 Mar 1993 / Argonne National Laboratory, IL (United States), Energy System Division. – Argonne, Illinois, 1993. – P. 1–62. – Режим доступа : <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/6504209>.
9. Ayres, David M. Removing Heavy Metals from Wastewater [Электронный ресурс] : Engineering Research Center Report / David M. Ayres, Allen P. Davis, Paul M. Gietka ; University of Maryland. – [S. l. : s. n.], 1994. – 21 p. – Режим доступа : <http://hmtl.itb.ac.id/wordpress/wp-content/uploads/2011/03/penyisihan-logam-berat.pdf>.
10. Armenante, Piero M. Precipitation of Heavy Metals from Wastewater [Электронный ресурс] / Piero M. Armenante // New Jersey Institute of Technology, New Jersey, 2006. – 39 p. – Режим доступа : <https://www.coursehero.com/file/9114052/Lecture-8>.
11. Heavy metals in wastewaters. Removal and Analyses [Электронный ресурс] / Ramboll. – [S. l. : s. n.], 2013. – 13 p. – Режим доступа : [http://www.ecoprofi.info/docs/event\\_2013-03-22\\_presentation\\_Ramboll\\_Varpula\\_en.pdf](http://www.ecoprofi.info/docs/event_2013-03-22_presentation_Ramboll_Varpula_en.pdf).

Получено 08.10.2015

## С. П. ВИСОЦЬКИЙ, Т. І. СТЕПАНЕНКО ОСАДЖЕННЯ МЕТАЛІВ ІЗ СТИЧНИХ ВОД Донбаська національна академія будівництва і архітектури

У стічних водах металургійних, коксохімічних, гірничодобувних підприємств містяться іони важких металів. Небезпечними з точки зору впливу на здоров'я населення є іони алюмінію, заліза, нікелю, міді. У статті досліджено вплив pH розчину на розчинність важких металів. Обґрунтовано необхідність ступеневого осадження металів із стічних вод. Визначено характеристики осадження сполук заліза з розчинів залежно від концентрації кислоти і температури розчину. Наведено аналітичні залежності, які характеризують вплив зазначених чинників на процес оброблення стічних вод.

**важкі метали, реагентний метод, стічні води, вапно, їдкий натр**

SERGEY VYSOTSKY, TATIANA STEPANENKO  
PRECIPITATION OF METALS FROM WASTEWATER  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

The wastewater metallurgical, mining companies contain heavy metal ions. Dangerous in terms of impact on human health are ions of aluminum, iron, nickel, copper. In the article the effect of pH on the solubility of heavy metals has been studied. The necessity of stepwise of deposition of metals from wastewater has been substantiated. The characteristics of the precipitation of iron compounds from solution, depending on the acid concentration and temperature of the solution have been determined. Analytical dependences characterizing the influence of these factors on the process of wastewater treatment has been received.

**heavy metal reagent method, wastewater, lime, caustic soda**

**Висоцький Сергій Павлович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри охорони праці, безпеки життєдіяльності та цивільного захисту Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Академік Міжнародної Енергетичної Академії, член-кореспондент Інженерної академії України. Наукові інтереси: енергоощадження; очистка природних і стічних вод; техногенна безпека.

**Степаненко Тетяна Іванівна** – асистент кафедри охорони праці, безпеки життєдіяльності та цивільного захисту Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: захист здоров'я людини і навколишнього середовища від негативного впливу стічних вод

**Высоцкий Сергей Павлович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой охраны труда, безопасности жизнедеятельности и гражданской защиты Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Академик Международной Энергетической Академии, член-корреспондент Инженерной академии Украины. Научные интересы: энергосбережение; очистка природных и сточных вод; техногенная безопасность.

**Степаненко Татьяна Ивановна** – ассистент кафедры охраны труда, безопасности жизнедеятельности и гражданской защиты Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: защита здоровья человека и окружающей среды от негативного воздействия сточных вод

**Vysotsky Sergey** – D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Occupational Safety and Health, Safety of Leaving and Civil Defense Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Academician of the International Energy Academy, a corresponding member of the Engineering Academy of Ukraine. Scientific interests: energy efficiency; natural and waste water treatment; technogenic safety.

**Stepanenko Tatiana** – assistant, Occupational Safety and Health, Safety of Leaving and Civil Defense Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: the protection of human health and the environment from the adverse effects of wastewater.

УДК 54.064

**С. П. ВЫСОЦКИЙ, А. В. ПИСАРЕНКО**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## **ПУТИ РЕШЕНИЯ ВОПРОСОВ СТРОИТЕЛЬСТВА В СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ПРИ ПОМОЩИ ХИМИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ**

В статье рассмотрены категории пригодности территорий под строительство зданий и сооружений. Представлена характеристика просадочных грунтов, подрабатываемых территорий и тиксотропных явлений. Приведены методы борьбы с просадками массивов грунта. Рассматривается применение добавки полиакриламида в качестве отвердителя силиката натрия при химическом закреплении просадочных грунтов. Даны рекомендации по укреплению грунтов химическими растворами.

**полиакриламид, подрабатываемые территории, просадочные грунты, тиксотропные явления, химическое закрепление**

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

При выборе территории под строительство одним из наиболее значимых факторов являются инженерно-геологические условия застраиваемой территории. Инженерно-геологические условия показывают пригодность территории для ведения на ней строительства с позиций устойчивости зданий и сооружений. Они включают в себя: геологическое строение территории; физико-геологические факторы; физико-химические и механические свойства грунтов; режим грунтовых вод. В современной строительной индустрии актуальной проблемой является строительство и эксплуатация зданий в сложных инженерно-геологических условиях. К таким условиям относятся подрабатываемые территории, территории с просадочными грунтами и территории с грунтами, которые подвержены влиянию тиксотропного эффекта.

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

Подавляющее большинство рецептов силикатизации грунтов были основаны на использовании неорганического полимера – силиката натрия. В дальнейшем разработка химических способов закрепления грунтов осуществлялась путем создания гелеобразующих растворов, которые представляли собой смесь раствора силиката натрия небольшой плотности с отверждающими растворами кислот и солей по Ржаницыну [1]. В работах В. Е. Соколовича [2] освещаются вопросы, касающиеся химического закрепления оснований, находящихся в сложных грунтовых условиях методом силикатизации.

### **ЦЕЛИ**

Обоснование и разработка химических композиций для структурирования почв и повышения надежности эксплуатации строительных сооружений и подземных трубопроводов.

### **ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ**

Подрабатываемые территории – территории, которые подвержены влиянию подземных горных разработок. Горные выработки образуются в районах добычи полезных ископаемых. Яркими примерами могут служить территории Донецкой, Луганской, Днепропетровской, частично

Полтавской и Харьковской областей Украины; а также территории Ростовской области Российской Федерации, которые расположены в Донецком угольном бассейне. В зависимости от глубины выработки различные способы добычи могут приводить к различной степени нарушения поверхности. Территории, расположенные над подземными выработками, могут проседать, поэтому освоение их под городскую застройку может быть проблематичным [3].

Просадочными грунтами называют пылевато-глинистые разновидности дисперсных осадочных минеральных грунтов (в основном лессовые грунты). Они имеют широкое распространение в мире, особенно в Европе и Азии. Просадочные грунты встречаются на территории юга европейской части Российской Федерации, на юге Западной Сибири, а также на юге Украины. Характерной особенностью лессовых просадочных грунтов является невысокая несущая способность, повышенная сжимаемость и ухудшение механических свойств при определенных воздействиях, связанных с увеличением влажности или подтоплением, а также с тектоническими действиями. Недооценка этих явлений может привести к большим, часто неравномерным просадкам, а в худшем случае – к потере устойчивости оснований зданий и сооружений. Просадки происходят в результате изменения структуры грунта, возникающие при замачивании при постоянной внешней нагрузке от зданий и сооружений или нагрузки от собственного веса грунта. Просадочность грунтов определяется особенностями процесса формирования и существования толщ этих грунтов, в результате чего они находятся в недоуплотненном состоянии [5]. Проседание грунта негативно влияет на эксплуатационную надежность зданий и сооружений и может служить причиной конструктивных повреждений зданий, объектов инфраструктуры, сельскохозяйственных земель и дренажных сетей. Исходя из результатов компрессионных исследований проб грунта, просадочные грунты можно разделить на два типа по условиям просадочности: когда под действием собственного веса грунта вся толща проседает не более чем на 5 см (I тип); когда под действием собственного веса грунта вся толща проседает более чем на 5 см (II тип) [6].

Тиксотропные явления наиболее ярко выражены в глинистых грунтах. Присущая им специфическая особенность изменять свои свойства при взаимодействии с водой, т. е. проявлять структурную неустойчивость, негативно влияет на эксплуатационную надежность зданий и сооружений. В мировой практике такие явления имели место быть неоднократно. Масштабными примерами в Украине можно считать тиксотропные сдвиги грунта в прибрежных городах, таких как Киев, Днепропетровск. Тиксотропными явлениями называют способность грунтов под влиянием механического воздействия (встряхивания, размешивания, вибрации) разжижаться и переходить в золи или суспензии и затем, когда это воздействие устранено, восстанавливать прежнее гелеобразное состояние. Возникают два следующих друг за другом процесса – разупрочнение и упрочнение. Процессы разупрочнения являются следствием механических воздействий, протекают весьма быстро. По прекращении внешнего воздействия немедленно начинается обратный процесс – упрочнение грунта. Упрочнение – процесс более медленный и протекает с неодинаковой скоростью. Для учета явлений тиксотропии при проектировании земляного полотна необходимо знать, при каких грунтах, их состояниях и характерах механических воздействий тиксотропное разупрочнение становится особенно опасным, а также является ли процесс упрочнения полностью обратимым, т. е. идет ли он до конца, а если и идет, то через какое время можно рассчитывать на полное восстановление первоначальных свойств грунтов [7].

В зависимости от величины деформаций земной поверхности и состояния грунта применяют различные мероприятия по увеличению его несущей способности, придания ему прочности, водонепроницаемости. Наиболее современным и эффективным технологическим методом укрепления массива грунта, оснований и фундаментов зданий и сооружений является подача материалов непосредственно в грунт, связывающих почву. В процессе закрепления между частицами грунта возникают прочные структурные связи за счет инъецирования в грунт и последующего твердения определенных реагентов. Это обеспечивает увеличение прочности грунтов, снижение их сжимаемости, уменьшение водопроницаемости и чувствительности к изменению внешней среды. Совершенствование метода инъекционного закрепления грунтов оснований зданий и сооружений с использованием инъекционных составов на основе местных особо тонкодисперсных вяжущих материалов обеспечит снижение затрат, трудоемкости и продолжительности работ, позволит повысить прогнозирование качества закрепленных грунтов и эффективность их использования при решении сложных геотехнических задач. С развитием химии высокомолекулярных соединений в промышленности освоен выпуск и возможность поставок материалов, обладающих уникальными свойствами. Например, некоторые полимеры позволяют на их основе получать вязкоупругие системы, проявляющие одновременно свойства твердого тела и жидкости, что открывает возможности для появления новых технических



решений. Следовательно, не вызывает сомнения актуальность разработки полимерных вязкоупругих систем, обладающих поршневым эффектом движения грунтовых масс, отличающихся псевдопластичностью, вязкоупругостью, когезионностью, способностью к самовосстановлению и уменьшению напряжений сдвига.

Полиакриламидом (ПАА) является полимер  $(-\text{CH}_2\text{CH}(\text{CONH}_2)-)_n$  сформированный из субэлементов акриламида, это длинноцепной полимер, созданный для привлечения как позитивно заряженных частиц (органические материалы, такие как углерод или человеческие отходы), так и негативно заряженных частиц (инертные материалы, такие как песок или глина). Полиакриламид может карбонизоваться в черный порошок при 210 градусах Цельсия без кислорода [7].

Применение полиакриламида можно наблюдать при бурении скважин, в качестве клея, для очистки воды в хозяйственно-питьевом водоснабжении, в качестве структурирующей добавки в сельском хозяйстве. Анионная форма полиакриламида с поперечными связями часто используется для улучшения почвы в строительстве для контроля эрозии, для защиты качества воды в близлежащих источниках и реках. Полиакриламид является очень эффективным при снижении эрозии почвы и может повышать водную инфильтрацию в ирригационных каналах. Перед подачей в процесс ПАА растворяется сначала до концентрации 1 %, а затем до 0,05–0,10 %. Подача его в пульпу такой концентрации наиболее эффективна. В настоящее время применяются рецептуры силиката натрия без учета состава и свойств грунта, что в определенных условиях не дает полного закрепления грунтового массива. Тем самым, применяя химические рецептуры без учета состава и свойств грунта, невозможно добиться качественного экономического эффекта. Чтобы силикат натрия способствовал последующему созданию каркаса в почве, необходимо снижать pH, или повышать температуру среды.

В форме неразветвленной цепи также используется как загуститель и суспендирующий агент. Анионный полиакриламид: этот тип полимера состоит из молекул, которые несут отрицательный заряд. Флокуляция и коагуляция твердых частиц в жидкости является одной из основных сфер применения полиакриламида. В области концентрированных растворов объемная доля полимера порядка единицы. Исследование перехода из режима разбавленных растворов в режим средней концентрации проводилось методами ротационной и капиллярной вискозиметрии. Данные, полученные методом ротационной вискозиметрии (белые символы), хорошо коррелируют с данными капиллярной вискозиметрии (черные символы). На концентрационных зависимостях удельной вязкости, представленных на рис. 1, отчетливо виден излом, соответствующий концентрации образования флуктуационной сетки зацеплений  $\text{Se}$  (на рис. отмечены стрелками). Зависимость удельной вязкости от концентрации задается соотношением [2]:  $\eta_{\text{уд}} = kc^m$ , показатель степени  $m$  определяется механизмом массопереноса. На степень связывания частиц оказывает вязкость полимеров.

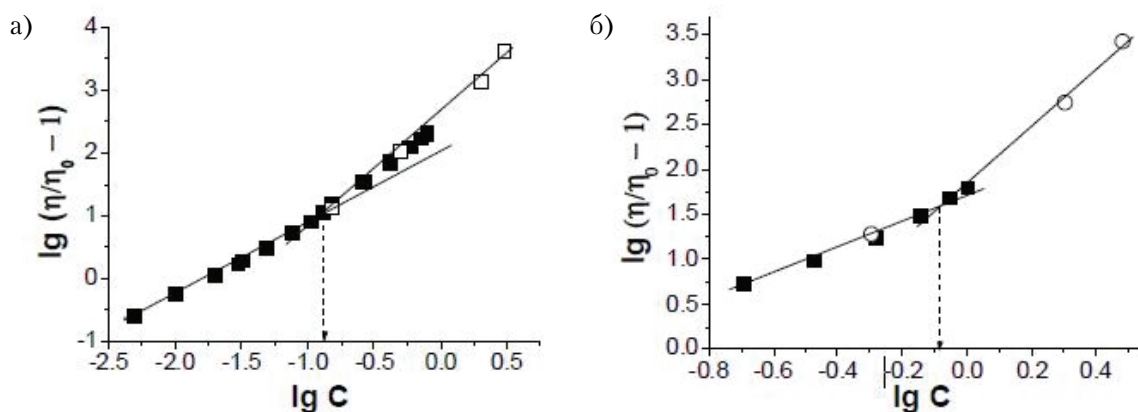


Рисунок 1 – Концентрационная зависимость удельной вязкости растворов: а) ПААм; б) ГПААм.

При образовании сетки укрупненных агрегатов частиц происходит изменение механизма массопереноса: в области растворов концентрации до движение макромолекул является трансляционным, в режиме полуконцентрированных растворов механизм движения становится диффузионным, что и объясняет излом на зависимости удельной вязкости от концентрации.

Для ПААм образование флуктуационной сетки зацеплений происходит при концентрации 0,13%, это существенно ниже  $C_e$  ГПААм (0,8 %), что объясняется электростатическим отталкиванием одноименно заряженных цепей ГПААм, препятствующим образованию зацеплений. Формирование трехмерной структуры при образовании флуктуационной сетки зацеплений определяет вид кривых течения полуконцентрированных растворов полиакриламида. С увеличением напряжения сдвига вязкость резко уменьшается, что вызвано разрушением структуры раствора. В разбавленных растворах вязкость практически не зависит от напряжения сдвига. Одним из важнейших параметров раствора полимера является энергия активации вязкого течения. Видно, что для исследуемых образцов во всем интервале концентраций значения  $E_a$  очень малы и по порядку величины совпадают с энергией активации вязкого течения растворителя.

Как правило, такие низкие значения  $E_a$  наблюдаются в разбавленных растворах полимеров. Элементарным актом течения является преодоление сегментом цепи потенциального барьера при переходе из одного положения в другое. При этом в разбавленном растворе каждый такой акт независим, а в полуконцентрированном для осуществления течения необходимо одновременное изменение положения нескольких сегментов. Это приводит к резкому росту энергии активации течения в полуконцентрированных растворах. В данном случае значения  $E_a$  остаются низкими даже при концентрациях, превышающих  $C_e$ . Можно предположить, что для исследованных в работе полимеров на начальном этапе формирования сетки зацеплений среднее расстояние между зацеплениями много больше длины сегмента, поэтому зацепления практически не влияют на механизм движения в масштабах сегмента. При этом на масштабах цепи механизм движения изменяется, о чем свидетельствуют приведенные ранее концентрационные зависимости удельной вязкости. Такое необычное поведение возможно, если концентрация звеньев в объеме полимерного клубка очень мала. В хорошем растворителе размер клубка пропорционален массе в степени 3/5 [7].

То есть с ростом молекулярной массы концентрация полимерных звеньев в объеме клубка существенно уменьшается. Оценить значение  $S_{кл}$  можно по величине обратной характеристической вязкости. На рис. 2 показана концентрационная зависимость приведенной вязкости раствора ПААм. Определенная из этой зависимости  $[\eta]$  составляет 53 дл/г, что соответствует  $S_{кл} \approx 0,02$  %.

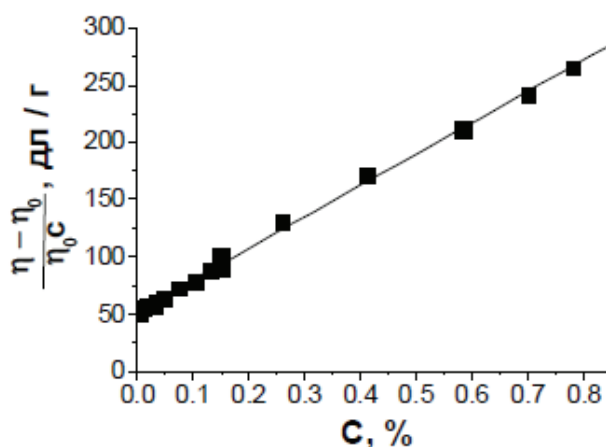


Рисунок 2 – Зависимость приведенной вязкости от концентрации ПААм,  $T = 20$  °С.

Увеличение температуры способствует «циклизации» или образованию поперечных связей, а результате чего при высоких температурах образуется «молибдатные неактивные» полимеры. Нагревание кремнекислоты с низким молекулярным весом при рН 3,82 приводило к образованию геля, в результате чего оставалось только 15 % кремневки в состоянии «активной молибденовой кислоты». При обычной температуре (25–300) минимальная скорость полимеризации имеет место при рН 1,8 (6), а при 900 протекает при рН ниже чем рН 1,0. значение рН, при котором имеется максимум стабильности, по-видимому, представляет область, где реакция катализируется водородными и/или фторидными ионами и минимум стабильности – где реакция катализируется гидроксильными ионами.

## ВЫВОДЫ

1. Одним из самых важных факторов эксплуатационной надежности объектов строительства являются инженерно-геологические условия застраиваемой территории.
2. Проседание грунта негативно влияет на эксплуатационную надежность зданий и сооружений и может служить причиной разрушений зданий, объектов инфраструктуры, газо- и водопроводов, а также дренажных коллекторов.
3. Применение своевременного укрепления грунтового массива химическими растворами способно минимизировать или полностью предотвратить негативное влияние просадок на здания и сооружения.
4. Химические рецептуры, представленные в статье, снижают водонасыщенность грунтов и действуют для увеличения степени дренирования почвы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ржаницын, Б. А. Химическое закрепление грунтов в строительстве [Текст] / Б. А. Ржаницын. – М. : Стройиздат, 1986. – 263 с.
2. Соколович, В. Е. Химическое закрепление грунтов [Текст] / В. Е. Соколович. – М. : Стройиздат, 1980. – 118 с.
3. Передельский, Л. В. Инженерная геология [Текст] / Л. В. Передельский, О. Е. Приходченко. – Ростов/Д. : Феникс, 2006. – 448 с.
4. Muthucumar, M. Dynamics of polyelectrolyte solutions [Текст] / M. Muthucumar // J. Chem. Phys. – 1997. – V. 107, № 7. – P. 2619–2635.
5. Далматов, Б. И. Механика грунтов, основания и фундаменты (включая специальный курс инженерной геологии) [Текст] : учебник / Б. И. Далматов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Стройиздат, 1988. – 416 с.
6. Жен, Пьер Жиль де. Идеи скейлинга в физике полимеров [Текст] / П. де Жен. – М. : Мир, 1982. – 376 с.
7. Сядук, Г. В. Реологические свойства водных растворов сверхвысокомолекулярного полиакриламида [Текст] / Г. В. Сядук, Е. А. Литманович // Структура и динамика молекулярных систем. – 2003. – Выпуск X, Часть 1. – С. 184–186.

Получено 18.10.2015

## С. П. ВИСОЦЬКИЙ, А. В. ПИСАРЕНКО ШЛЯХИ ВИРІШЕННЯ ПИТАНЬ БУДІВНИЦТВА В СКЛАДНИХ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНИХ УМОВАХ ЗА ДОПОМОГОЮ ХІМІЧНИХ РОЗЧИНІВ Донбаська національна академія будівництва і архітектури

У статті розглянуто категорії придатності територій під будівництво будівель і споруд. Надана характеристика просадних ґрунтів і підроблюваних територій. Наведено методи боротьби з просадками масивів ґрунта. Розглядається застосування добавки поліакриламід у якості затверджувача силікату натрію при хімічному закріпленні просадних ґрунтів. Дано рекомендації з укріплення ґрунтів хімічними розчинами.

**поліакриламід, підроблювані території, просадні ґрунти, хімічне закріплення**

## SERGEY VYSOTSKY, ANASTASIA PISARENKO SOLUTIONS OF QUESTIONS OF CONSTRUCTION IN DIFFICULT ENGINEERING-GEOLOGICAL CONDITIONS BY MEANS OF CHEMICAL SOLUTIONS

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

In article categories of suitability of territories under construction of buildings and constructions are considered. The characteristic of collapsible soil and the earned additionally territories is submitted. Methods of fight against sags of massifs of soil are given. Application of an additive of polyacrylamide as a sodium silicate hardener at chemical fixing of collapsible soil is considered. Recommendations about strengthening of soil are made by chemical solutions.

**polyacrylamide, the earned additionally territories, collapsible soil, chemical fixing**

**Висоцький Сергій Павлович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри охорони праці, безпеки життєдіяльності та цивільного захисту Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Академік Міжнародної Енергетичної Академії, член-кореспондент Інженерної академії України. Наукові інтереси: енергозбереження; очистка природних і стічних вод; техногенна безпека.

**Писаренко Анастасія Валеріївна** – асистент кафедри охорони праці, безпеки життєдіяльності та цивільного захисту Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: оцінка обстановки можливого виникнення НС при просіданні ґрунтів у разі проектування будівель і споруд на підроблюваних територіях

**Высоцкий Сергей Павлович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой охраны труда, безопасности жизнедеятельности и гражданской защиты Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Академик Международной Энергетической Академии, член-корреспондент Инженерной академии Украины. Научные интересы: энергосбережение; очистка природных и сточных вод; техногенная безопасность.

**Писаренко Анастасия Валериевна** – ассистент кафедры охраны труда, безопасности жизнедеятельности и гражданской защиты Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: оценка обстановки возможного возникновения ЧС при проседании грунтов в случае проектирования зданий и сооружений на подрабатываемых территориях.

**Vysotsky Sergey** – D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Occupational Safety and Health, Safety of Leaving and Civil Defense Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Academician of the International Energy Academy, a corresponding member of the Engineering Academy of Ukraine. Scientific interests: energy efficiency; natural and waste water treatment; technogenic safety.

**Pisarenko Anastasia** – Assistant, Occupational Safety and Health, Safety of Leaving and Civil Defense Department, National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: assessment of the situation at the possible occurrence of emergency situations in the case of subsidence of designing buildings and structures on undermined territories food.

УДК 614.8.084

**Н. С. ПОДГОРОДЕЦКИЙ**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ, РАБОТАЮЩЕГО ПОД ИЗБЫТОЧНЫМ ДАВЛЕНИЕМ ПУТЕМ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ**

В статье изложены результаты анализа возможности использования технологии фазированных решеток для ультразвуковой диагностики оборудования, работающего под избыточным давлением.

**оборудование, работающее под избыточным давлением, ультразвуковой контроль, фазированная решетка**

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

При длительной эксплуатации оборудования, работающего под избыточным давлением, неизбежно возникают повреждения или нарушения работоспособности его элементов даже при отсутствии дефектов изготовления и соблюдении правил эксплуатации. Это обусловлено особенностями технологического процесса: высокой коррозионной активностью технологических сред, высокими температурами, давлением и скоростью технологических потоков и т. д. Кроме того, даже при соблюдении технологической дисциплины при эксплуатации оборудования неизбежны колебания состава сырья и реагентов, в том числе содержания в них агрессивных компонентов; колебания регулируемых параметров (температуры, давления, расхода и др.), обусловленные запаздыванием регулирования; колебания внешних воздействий (напряжения электропитания, температуры и давления технологического пара, охлаждающей воды и др.). Воздействие указанных факторов в течение длительного времени вызывает повреждение металлических конструкций оборудования, а также развитие микротрещин на поверхности нагруженных элементов сосудов [1].

Непрерывное повышение требований к надежности и безопасности работы оборудования, работающего под избыточным давлением, предопределяет широкое применение физических методов и приборов ультразвукового неразрушающего контроля. Ультразвуковой контроль отличается многообразием методов, типов применяемых волн, широким диапазоном частот. Перспективным направлением дальнейшего развития методов ультразвукового контроля является технология ультразвуковых фазированных решеток.

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

В литературе обсуждаются различные способы фокусирования ультразвука, основанные на применении одиночных фокусирующих преобразователей [2], линз, а также фазированных решеток [3–5].

В статье «Повышение эффективности ультразвуковых методов контроля и диагностики для обеспечения безопасной эксплуатации строительных объектов на основе технологии фазированных решеток» авторами В. С. Моркуном и Н. С. Подгородецким изложены результаты анализа возможности использования технологии фазированных решеток для построения систем контроля и диагностики на основе высокоэнергетического ультразвука. В частности было установлено, что фазированные решетки имеют ряд преимуществ перед распространенными в настоящее время методами ультразвукового контроля: программное управление углом луча, фокальным расстоянием и размером электронного пятна, контроль одним многоэлементным датчиком под разными углами,

большая гибкость в контроле объектов со сложной геометрией, высокоскоростное сканирование без механических приспособлений. Это позволяет существенно повысить качество и эффективность диагностических процедур [6].

Недостатками фазированных решеток является присутствие в их акустическом поле вторичных максимумов интенсивности, обусловленных в частности наличием дискретной структуры решетки, а также их сложность и относительно высокая стоимость аппаратуры, необходимой для ее работы [7].

## ЦЕЛЬ

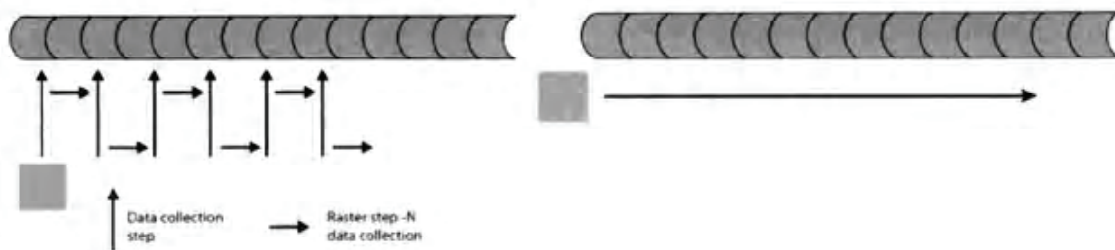
Исследовать возможность использования технологии фазированных решеток для построения систем контроля и диагностики оборудования, работающего под избыточным давлением на основе высокоэнергетического ультразвука.

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Оборудование, работающее под избыточным давлением контролируют согласно кодам ASME в зависимости от его назначения.

Процедура контроля предписывает один или два определенных угла ввода, под которыми контролируется сварной шов, зона термического влияния и прилегающий основной металл. Один из углов составляет  $45^\circ$  для поперечной волны, что обеспечивает надежное выявление трещин, выходящих на поверхность благодаря угловому эффекту. Второй рекомендованный угол ввода отличается не менее чем на  $10^\circ$  и выбирается исходя из особенностей контролируемого шва и предполагаемых дефектов. Преобразователи с рекомендованными углами перемещаются в заданных пределах таким образом, чтобы при сканировании озвучить необходимый объем шва и околошовной зоны. Для контроля кольцевых швов трубопроводов чаще всего используется «зонная дискриминация», подразумевающая разделение шва на вертикальные зоны, каждая из которых контролируется сфокусированным наклонным лучом; при этом преобразователь перемещается по окружности трубы на определенном расстоянии от шва, затем смещается по оси трубы для контроля следующей зоны и т. д.

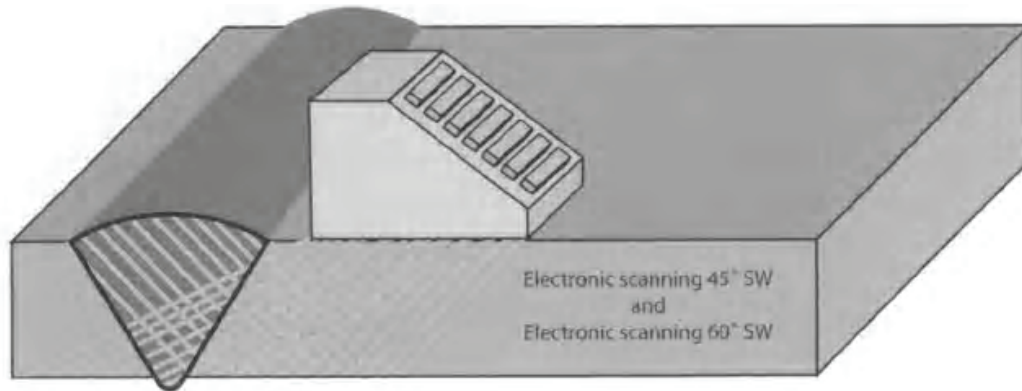
Технология контроля фазированными решетками предполагает вместо поперечного перемещения преобразователя (растрового сканирования) электронное поперечное сканирование, что существенно уменьшает время сканирования. При этом преобразователь перемещается механически только в продольном направлении (вдоль контролируемого сварного шва). Отличие традиционного и нового методов иллюстрируются на рис. 1 [8].



**Рисунок 1** – Сравнение традиционного растрового сканирования (слева) и сканирования фазированной решеткой (справа).

Электронное поперечное сканирование обеспечивает контроль всего сечения шва из одного положения преобразователя, а его механическое перемещение обеспечивает контроль всей протяженности шва.

Преимущество фазированных решеток для построения систем контроля и диагностики оборудования, работающего под избыточным давлением, состоит в том, что возможно выполнять озвучивание под множеством углов или выполнять линейное сканирование под заданными углами. На рис. 2 показано, как фазированной решеткой выполняется электронное сканирование под углами  $60^\circ$  (прямым лучом) и  $45^\circ$  (отраженным лучом) поперечной волной, что полностью соответствует требованиям кода ASME [8].



**Рисунок 2** – Озвучивание сварного шва прямым и отраженным лучом под фиксированными углами с помощью электронного сканирования.

Использование фазированных решеток для построения систем контроля и диагностики оборудования, работающего под избыточным давлением, обеспечивает прозвучивание под двумя или более углами ввода, что позволяет надежно обнаруживать дефекты сварки заданной ориентации и охватить наибольшую контролируемую область. Линейное продольное сканирование значительно ускоряет процесс диагностики и позволяет как уменьшать скорость сканирования объекта, так и увеличивать разрешающую способность контроля или совмещать их. Значительно ускоряется и упрощается получение реальных изображений положения и размеров дефектов, а также их интерпретация. Отчетные данные могут быть записаны в реальном времени и представлены в виде изображения, что облегчает анализ результатов контроля для персонала. Возможность выбора манипулятора (сканер на магнитных колесах, «охватывающий» сканер для малых диаметров, вращение самого объекта контроля, манипулятор-робот, ручное сканирование с различными датчиками координаты и т. п.) позволяет полностью заменить радиографический и рентгеновский виды контроля (из соображений требований техники безопасности) и значительно снизить стоимость контроля.

Важной процедурой ультразвукового контроля оборудования, работающего под избыточным давлением, является определение аналитических выражений плоскости сканирования в виде центральной проекции объекта контроля. Будем использовать для этого подход, приведенный в работе [9]. Рассмотрим построение центральной проекции точки  $\vec{R}(R_x, R_y, R_z)$  на заданную плоскость  $\Sigma$ . Центр проектирования  $\vec{C}(C_x, C_y, C_z)$  будем считать заданным.

Для решения рассматриваемой задачи будем полагать, что плоскость  $\Sigma$  определяется точкой  $\vec{O}(O_x, O_y, O_z)$  и двумя векторами  $\vec{n}_1$  и  $\vec{n}_2$ . Будем считать, что эти векторы являются единичными и ортогональными. Если точка  $\vec{R}_i$  является центральной проекцией точки  $\vec{R}$  на плоскость  $\Sigma$ , то

$$\begin{cases} (\vec{R}_i - \vec{O}) \cdot [\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2] = 0 \\ (\vec{R}_i - \vec{C}) \cdot (\vec{R} - \vec{C}) = \vec{o} \end{cases} \quad (1)$$

где  $\vec{o}$  – нулевой вектор.

Рассмотрим поверхность, заданную в параметрическом виде  $\vec{R} = \vec{R}(u, v)$ . Для определения центральной проекции поверхности необходимо построить касательную коническую поверхность с вершиной в точке  $\vec{C}$  и найти линию ее пересечения с плоскостью  $\Sigma$ . Система, которая позволяет построить контур центральной проекции пространственного объекта на заданную плоскость  $\Sigma$  имеет следующее аналитическое выражение

$$\begin{cases} (\vec{R}_i - \vec{O}) \cdot [\vec{n}_1 \cdot \vec{n}_2] = 0 \\ (\vec{R}_i - \vec{C}) \cdot (\vec{R} - \vec{C}) = \vec{o} \\ (\vec{R} - \vec{C}) \cdot (\vec{R}_u - \vec{C}_i) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

где  $\vec{R}$  – точка, принадлежащая поверхности  $\vec{R} = \vec{R}(u, v)$ .

Используя тот факт, что векторы  $\vec{R}_i - \vec{C}$  и  $\vec{R} - \vec{C}$  отличаются только на масштабный множитель, получим



$$\bar{R}_i = \bar{C} + \frac{(\bar{O} - \bar{C}) \cdot [\bar{n}_1 \cdot \bar{n}_2]}{(\bar{R} - \bar{C}) \cdot [\bar{n}_1 \cdot \bar{n}_2]} \cdot \bar{R} - \bar{C}. \quad (3)$$

Уравнения контура плоской проекции пространственного объекта записаны в трехмерной пространственной системе координат. Они могут быть преобразованы в систему координат на плоскости  $\Sigma$  следующим образом

$$\begin{cases} \bar{x} = (\bar{R}_i - \bar{O}) \cdot \bar{n}_1 \\ \bar{y} = (\bar{R}_i - \bar{O}) \cdot \bar{n}_2 \end{cases} \quad (4)$$

Приведенный подход позволяет получить аналитическое выражение произвольной плоскости сканирования пространственного объекта и выполнить его анализ сфокусированным должным образом ультразвуковым лучом.

## ВЫВОД

Высокая точность определения положения, ориентации и размеров дефектов, улучшенная по сравнению с одиночными преобразователями, фронтальная и лучевая разрешающая способность, возможность классификации дефектов по типу на основании изображения их образов позволяют сделать заключение о высокой эффективности методов ультразвукового контроля с использованием технологии фазированных решёток.

Безопасную эксплуатацию оборудования, работающего под избыточным давлением, возможно обеспечить с помощью систем контроля и диагностики с использованием технологии фазированных решёток.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экспертиза сосудов, работающих под давлением [Текст] / И. Р. Гумиров, А. Р. Мусин, А. О. Шитов [и др.] // Потенциал современной науки. – 2015. – № 6. – С. 33–37.
2. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля [Текст] : научное издание / И. Н. Ермолов [и др.] ; ред. И. Н. Ермолов. – Москва : Машиностроение, 1986. – 278 с.
3. Fry, F. J. Intense focused ultrasound: its production, effects and utilization [Текст] / F. J. Fry // Ultrasound: Its Application in Medicine and Biology. Part II, Volume III / edited F. J. Fry. – New York : Elsevier, 1978. – P. 689–736.
4. Hill, C. R. Review article: High intensity focused ultrasound – potential for cancer treatment [Текст] / C. R. Hill, G. R. ter Haar // Br. J. Radiology. – 1995. – V. 68, № 816. – P. 1296–1303.
5. Гаврилов, Л. Р. Двумерные фазированные ультразвуковые решетки для применения в хирургии: перемещение одиночного фокуса [Текст] / Л. Р. Гаврилов, Дж. У. Хэнд // Акустический журнал. – 2000. – Том 46. – С. 456–466.
6. Моркун, В. С. Повышение эффективности ультразвуковых методов контроля и диагностики для обеспечения безопасной эксплуатации строительных объектов на основе технологии фазированных решеток [Текст] / В. С. Моркун, Н. С. Подгородецкий // Вестник Криворожского Национального университета. – 2012. – № 33. – С. 93–97.
7. Моркун, В. С. Экспертное обследование строительных объектов с использованием технологии ультразвуковой фазированной решетки [Текст] / В. С. Моркун, Н. С. Подгородецкий // Вестник Криворожского Национального университета. – 2013. – № 34(1). – С. 6–9.
8. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications [Текст] / Technical reviewer and adviser Michael D. C. Moles. – Waltham : Olympus NTD, 2007. – 467 p. – (Advanced Practical NDT Series). – ISBN 0-9735933-4-2.
9. Дубанов, А. А. Построение центральной проекции объекта в среде программирования «Mathcad 2000–2001» [Текст] / А. А. Дубанов // Прикладная геометрия : Электронный журнал. – 2002. – Выпуск 4, № 6. – С. 55–59.

Получено 28.09.2015

**М. С. ПОДГОРОДЕЦЬКИЙ**  
**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ, ЩО**  
**ПРАЦЮЄ ПІД НАДЛИШКОВИМ ТИСКОМ, ШЛЯХОМ ПІДВИЩЕННЯ**  
**ЕФЕКТИВНОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ І**  
**ДІАГНОСТИКИ**

Донбаська національна академія будівництва і архітектури

У статті викладені результати аналізу можливості використання технології фазированих решіток для ультразвукової діагностики обладнання, що працює під надлишковим тиском.

**обладнання, що працює під надлишковим тиском, ультразвуковий контроль, фазирована решітка**



NICHOLAS PODGORODETSKY  
ENSURING SAFE OPERATION OF EQUIPMENT OPERATING UNDER  
EXCESSIVE PRESSURE BY INCREASING THE EFFICIENCY OF ULTRASONIC  
METHODS FOR MONITORING AND DIAGNOSTICS

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

The article deals with the analysis of the possibility of using the technology Phased Array Ultrasonic diagnostic equipment operating under excessive pressure.

**equipment operating under excessive pressure, ultrasonic testing, phased array**

**Подгородецкий Микола Сергійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри охорони праці, безпеки життєдіяльності та цивільного захисту Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: охорона праці в будівництві; енергоефективні методи контролю та діагностики для безпечного будівництва та експлуатації свердловин з видобутку сланцевого газу; підвищення енергоефективності управління подрібнювальним переділом промислової сировини в будівництві; підвищення ефективності ультразвукових методів контролю та діагностики для забезпечення безпечної експлуатації будівельних об'єктів.

**Подгородецкий Николай Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры охраны труда, безопасности жизнедеятельности и гражданской защиты Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: охрана труда в строительстве; энергоэффективные методы контроля и диагностики для безопасного строительства и эксплуатации скважин по добыче сланцевого газа; повышение энергоэффективности управления измельчительным переделом промышленного сырья в строительстве; повышение эффективности ультразвуковых методов контроля и диагностики для обеспечения безопасной эксплуатации строительных объектов.

**Podgorodetsky Nicholas** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Occupational Safety and Health, Safety of Leaving and Civil Defense Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: labor safety in construction; energy-efficient methods of control and diagnostics for the safe construction and operation of wells for the extraction of shale gas; energy efficiency management crushing redistribution of industrial raw materials in construction; improving the efficiency of ultrasonic methods for monitoring and diagnostics to ensure safe operation of construction projects.

УДК 532.17

**З. В. УДОВИЧЕНКО, Д. В. САВИЧ**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СВОЙСТВ ВЕРТИКАЛЬНО СТЕКАЮЩЕЙ ПЛЕНКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ВОДНОГО РАСТВОРА ЩЕЛОЧИ**

Проведены теоретические и лабораторные исследования поверхностных свойств промежуточного пленочного теплоносителя в установке утилизации теплоты и очистки вентиляционных выбросов стекольного производства на основе водного раствора гидроксида натрия. В результате исследований получена температурная зависимость коэффициента поверхностного натяжения воды, в интервале температур от 10 до 100 °С, от содержания в ней растворенного NaOH. Определено, что при концентрации щелочи в растворе NaOH в пределах от 70 до 80 % водный раствор удовлетворяет предъявляемым требованиям по температуре кипения, а также требованиям технологии производства стеклоизделий.

**теплоноситель, раствор, щелочь, пленочное течение, утилизация теплоты, очистка выбросов**

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

В настоящее время очистка высокотемпературных газов от пыли при работе технологического оборудования на стекольных заводах осуществляется преимущественно в сухих циклонах и мокрых пылеуловителях различных конструкций. Пыль стекольного производства с размерами частиц 10 мкм чрезвычайно сложно уловить циклонами. Поэтому для достижения требуемого эффекта пылеулавливания предприятия используют третью ступень очистки – фильтры, требующие в процессе эксплуатации постоянной регенерации и быстрой замены, что приводит к дополнительным экономическим затратам.

Эффективно обеспечить утилизацию теплоты и экономию топливно-энергетических ресурсов можно с помощью устройств на основе теплопередающих элементов, защищенных от налипания пыли гравитационно стекающим промежуточным пленочным пылепоглощающим теплоносителем, обеспечивающим очистку от пыли и утилизацию теплоты при минимальных расходах электроэнергии и ассимилирующей жидкости.

Однако при использовании конструкций аппаратов со стекающим по вертикально расположенным трубкам промежуточным теплоносителем с увеличением высоты трубки и скорости стекания воды возникает волновое движение пленки жидкости, что влечет за собой растяжение пленки вещества на гребнях волн и сжатие во впадинах вплоть до возникновения эффекта отрыва. Содержащиеся в вентиляционных выбросах стекольного производства окислы Na и K, переходя в раствор, снижают поверхностное натяжение воды и приводят к возникновению тангенциальных сил, действующих на граничной поверхности пленки, что ведет к изменению условий и режима течения жидкости.

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

В. Г. Левичем [1] разработана теория гашения волн веществами, снижающими поверхностное натяжение жидкости. Согласно этой теории, изменение распределения скоростей в жидкости вследствие изменения граничных условий приводит к гашению волн. Эти основные положения теории нашли свое подтверждение в целом ряде работ [2–9]. Отмечено, что с повышением концентрации веществ,

снижающих поверхностное натяжение, растёт гасящее действие волн. Существует оптимальная концентрация этих веществ, при которой гасящее действие их уже не проявляется. Такая оптимальная концентрация соответствует количеству вещества, необходимого для создания насыщенного моно-слоя на поверхности раздела фаз.

В работе [7] показано, что с увеличением концентрации снижающих поверхностное натяжение жидкости веществ волнообразование начинается на все большем расстоянии от распределительно-го устройства. Одновременно они оказывают влияние на критическое число Рейнольдса. При снижении коэффициента поверхностного натяжения ( $\sigma$ ) с 0,0603 до 0,035 Н/м критическое значение числа  $Re_{кр}$  возрастает с 1 000...2 000 до 4 000...4 500. Аналогичные данные получены в работе [6], в которой при изменении  $\sigma$  с 0,0685 до 0,0448 Н/м критическое значение числа Рейнольдса увеличивалось от 2 000 до 5 200 ( $Re_{кр}$  для обычной воды составляет около 1 600). Верхние значения  $\sigma_0$  характерны для чистой воды в интервале температур от 40 до 90 °С. В безразмерном виде эти результаты можно обобщить выражением

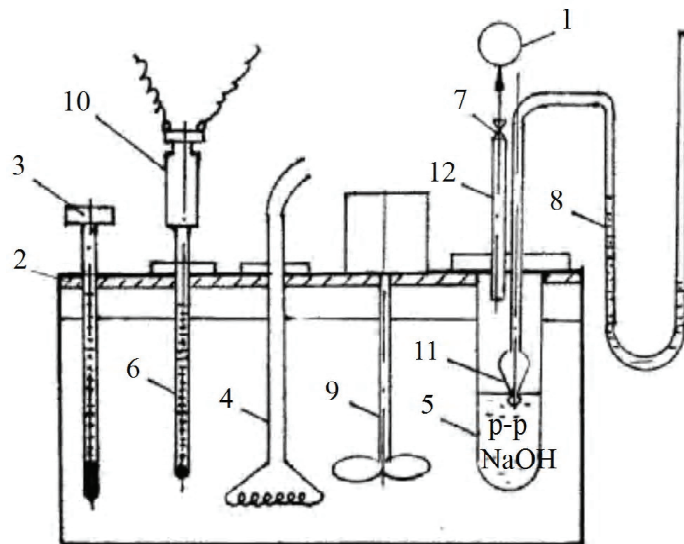
$$Re_{кр} = 1600 \cdot \left( \frac{\sigma_0}{\sigma_{вещ}} \right)^2. \quad (1)$$

Добавки веществ, снижающих поверхностное натяжение, приводят к тому, что при плотности орошения, обеспечивающей гладкую поверхность пленки, амплитуда волн при любых концентрациях равна нулю.

Учитывая необходимость растворения уловленной пыли, содержащей частицы шихты стеклоного производства, в которой основным компонентом является  $Na_2O$  (около 90 %), и возможность использования этого раствора в технологическом процессе изготовления стекла в качестве промежуточного теплоносителя, предложен водный раствор  $NaOH$ .

#### СХЕМА УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования поверхностных свойств водного раствора  $NaOH$  поверхностное натяжение определяли измерением наибольшего давления газовых пузырьков, образующихся в жидкости. Схема установки приведена на рисунке.



**Рисунок** – Схема установки для определения поверхностного натяжения водного раствора  $NaOH$ : 1 – водоструйный насос; 2 – термостат; 3 – контактный термометр; 4 – электронагреватель; 5 – пробирка с раствором  $NaOH$ ; 6 – термохимический термометр; 7 – кран; 8 – микроманометр; 9 – мешалка; 10 – электронное реле; 11 – капилляр; 12 – отвод воздуха.

Согласно формуле Лапласа избыточное давление  $P$  прямо пропорционально поверхностному натяжению и обратно пропорционально радиусу капилляра  $r$

$$P = A \cdot \sigma / r, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкости, Н/м;  
 $A$  – коэффициент пропорциональности.

Обычно величину  $A$  не определяют, а проводят измерение величины  $P$  для исследуемой и стандартной жидкости, для которой величина  $\sigma$  при заданной температуре известна.

Все величины для стандартной жидкости имеют индекс «нуль».

Определяемую величину поверхностного натяжения вычисляли по уравнению

$$\sigma = \sigma_0 \cdot P / P_0, \quad (3)$$

причем  $P$  и  $P_0$  определяют экспериментальным путем, а  $\sigma_0$  – по таблицам.

Жидкость, поверхностное натяжение которой измеряется, заливается в сосуд 5, который помещают в термостат. После выдержки в термостате 5...10 мин (в зависимости от количества залитой в сосуд жидкости) в сосуд вставляется капилляр с пробкой, которая плотно прилегает к стенке сосуда. Положение капилляра в пробке подбирают так, чтобы его торец только касался поверхности жидкости. Температура жидкости в термостате поддерживается в автоматическом режиме. Значение температуры задается с помощью контактного термометра, который разрывает электрическую цепь при достижении жидкостью заданной температуры при нагреве ее нагревательным элементом 4 или замыкает ее при понижении ниже установленного уровня. Значение температуры жидкости в термостате (и в сосуде 5) измеряют с помощью термометра 6.

Для проведения эксперимента открывают кран 7 емкости с жидкостью 1. Вода из емкости 1 должна вытекать медленно – одна капля в 3...4 с. Вследствие вытекания воды в емкости 1 и в сосуде 5 будет создаваться разрежение. Давление внутри капилляра остается неизменным и равно атмосферному. Максимальное показание микроманометра 8 будет иметь место в момент отрыва пузырька. Измерение максимального разрежения над жидкостью осуществляют 10...15 раз при заданной температуре. Затем с помощью контактного термометра устанавливают более высокие значения температуры, ожидают нагрева жидкости и вновь производят измерения давления над жидкостью.

После проведения экспериментов при нескольких значениях температуры в сосуд 5, после удаления из него исследуемой жидкости, заливают стандартную жидкость и при тех же значениях температуры, при которых определялось разрежение в сосуде 5 при залитой исследуемой жидкости, производят измерения для стандартной жидкости.

В результате обработки экспериментальных данных проведен сравнительный анализ значений поверхностного натяжения при различных температурах  $\sigma_0$  для стандартной жидкости, определенных по таблицам, и для соответствующих значений поверхностного натяжения согласно уравнению (3) по результатам измерений  $P$  и  $P_0$  для исследуемой жидкости.

В результате исследований получена температурная зависимость коэффициента поверхностного натяжения воды, в интервале температур от 10 до 100 °С, от содержания в ней растворенного NaOH, которая имеет следующий вид:

$$\sigma = 0,04 \cdot (1,89 - C_{NaOH}) \cdot (1 - 0,002 \cdot t), \quad (4)$$

где  $C_{NaOH}$  – массовая доля NaOH в растворе.

В связи с возможностью нагрева жидкой пленки теплоносителя до температуры 120–125 °С исследована зависимость температуры кипения водного раствора NaOH от концентрации щелочи. Эта зависимость описывается следующим уравнением

$$t_k = 100 + 0,04 \cdot C_{NaOH}, \quad (5)$$

где  $C_{NaOH}$  – концентрация NaOH в растворе, %.

Исследования показали, что при средней температуре воды 70 °С и концентрации NaOH в пределах 60...80 % значение коэффициента поверхностного натяжения раствора снижается до 0,045...0,038 Н/м. В этих условиях обеспечивается возможность увеличения плотности орошения в докритической области до 1,25 кг/(м·с) и толщины пленки промежуточного теплоносителя до  $7 \cdot 10^{-4}$  м.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, при концентрации щелочи в растворе NaOH в пределах от 70 до 80 % водный раствор удовлетворяет предъявляемым требованиям по температуре кипения, а также требованиям технологии производства стеклоизделий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левич, В. Г. Физико-химическая гидродинамика [Текст] / Вениамин Григорьевич Левич. – Изд. 2-е, дополненное и переработанное. – М. : ГИМФЛ, 1959. – 700 с.
2. Тананайко, Ю. М. Методы расчета и исследования пленочных процессов [Текст] / Юрий Мартирьевич Тананайко, Евгений Григорьевич Воронцов. – К. : Техника, 1975. – 311 с.
3. Nusselt, W. Die oberflächenkondensation des wasserdampfes [Текст] / W. Nusselt // Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure. – 1916. – Vol. 60, № 27. – P. 541–546. (in German).
4. Sparrow, E. M. Laminar free convection from a vertical plate with uniform surface heat flux [Текст] / E. M. Sparrow, J. L. Gregg // Trans. Am. Soc. Mech. Eng. – 1956. – Vol. 78. – P. 435–440.
5. Shu, J.-J. Thermal interaction between free convection and forced convection along a vertical conducting wall [Текст] / J.-J. Shu, I. Pop // Heat Mass Transf. – 1999. – Vol. 35, № 1. – P. 33–38.
6. Суслов, В. А. Исследование гидродинамики и теплоотдачи при гравитационном стекании пленки сульфатного щелока в вертикальной трубе выпарного аппарата [Текст] / В. А. Суслов // Целлюлоза. Бумага. Картон. – 2005. – № 5. – С. 68–71.
7. Qi Zhao. Surface materials with dropwise condensation made by ion implantation technology [Текст] / Zhao Qi, Zhang Dongchang, Lin Jifang // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1991. – Vol. 34, № 11. – P. 2833–2835.
8. Heat transfer and rivulet structures formation in a falling thin liquid film locally heated [Текст] / O. A. Kabov, B. Scheid, I. A. Sharina, J.-C. Legros // Intern. J. Therm. Sciences. – 2002. – Vol. 41. – P. 664–672.
9. Чиннов, Е. А. Формирование струйных течений при гравитационном стекании волновой нагреваемой пленки жидкости [Текст] / Е. А. Чиннов, О. А. Кабов // ПМТФ. – 2003. – Т. 44, № 5. – С. 128–137.

Получено 29.09.2015

### З. В. УДОВИЧЕНКО, Д. В. САВИЧ ВИЗНАЧЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЛІВКИ ТЕПЛОНОСІЯ, ЩО ВЕРТИКАЛЬНО СТИКАЄ, НА ОСНОВІ ВОДНОГО РОЗЧИНУ ЛУГУ Донбаська національна академія будівництва і архітектури

Проведено теоретичні та лабораторні дослідження поверхневих властивостей проміжного плівкового теплоносія в установці утилізації теплоти та очищення вентиляційних викидів скляного виробництва на основі водного розчину гідроксиду натрію. В результаті досліджень отримана температурна залежність коефіцієнта поверхневого натягу води, в інтервалі температур від 10 до 100 °С, від вмісту в ній розчиненого NaOH. Визначено, що при концентрації лугу в розчині NaOH в межах від 70 до 80 % водний розчин задовольняє пропонованим вимогам по температурі кипіння, а також вимогам технології виробництва скловиробів

**теплоносій, розчин, луг, плівкова течія, утилізація теплоти, очищення викидів**

### ZLATA UDOVICHENKO, DARYA SAVICH DETERMINATION OF THE SURFACE PROPERTIES OF VERTICALLY FALLING FILM OF COOLANT BASED ON AN AQUEOUS ALKALI SOLUTION Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

The theoretical and laboratory research of the surface properties of the intermediate film coolant in the installation of the heat recovery and ventilation exhaust cleaning glass production based on an aqueous solution of sodium hydroxide, have been carried out. As a result of researching the temperature dependence of the surface tension of water has been given, at temperatures ranging from 10 to 100 °C, the content of dissolved NaOH. It has been determined that, when alkali concentration in the NaOH solution in the range from 70 to 80 % aqueous solution satisfies the requirements for the boiling point as well as the requirements of the production technology of glass.

**coolant solution, alkali, film flow, heat recovery, cleaning emissions**

**Удовиченко Злата Вікторівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання і вентиляції Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: енергоощадні технології в системах теплогазопостачання і вентиляції.

**Савіч Дар'я Володимирівна** – асистент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання і вентиляції Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: енергоощадні технології в системах теплогазопостачання і вентиляції.

**Удовиченко Злата Викторовна** – кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: энергоресурсосбережение в системах теплогазоснабжения и вентиляции.

**Савич Даря Владимировна** – ассистент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: энергоресурсосбережение в системах теплогазоснабжения и вентиляции.

**Udovichenko Zlata** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Heating Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: energy saving technologies in the heat-gas supply and ventilation systems.

**Savich Darya** – Assistant, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: energy saving technology. Scientific interests: energy saving technologies in the heat-gas supply and ventilation systems.

УДК 697.353.2

**А. А. ОЛЕКСЮК, И. Г. ШИТИКОВА**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПУТЕЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В ТРЕХКОНТУРНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ ЗМЕЕВИКОВОГО ТИПА ДЛЯ НЕЗАВИСИМЫХ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ И ГВС**

Рассмотрена саморегулирующая система теплоснабжения от индивидуальных тепловых пунктов с подогревательно-аккумуляторной установкой и теплообменниками змеевикового типа для независимых систем отопления и горячего водоснабжения. Термодинамическая эффективность работы теплообменных аппаратов зависит от многих параметров и факторов, таких как: тепловая мощность, расход и качество теплоносителя, техническое назначение и конструктивное исполнение, направление движения теплоносителей, наличие и качество тепловой изоляции. Эксергетический метод позволяет дать оценку полноты использования переноса теплоты между теплоносителями и оценку полноты использования ее термической, энергетической, механической и гидродинамической полезности.

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

### **ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

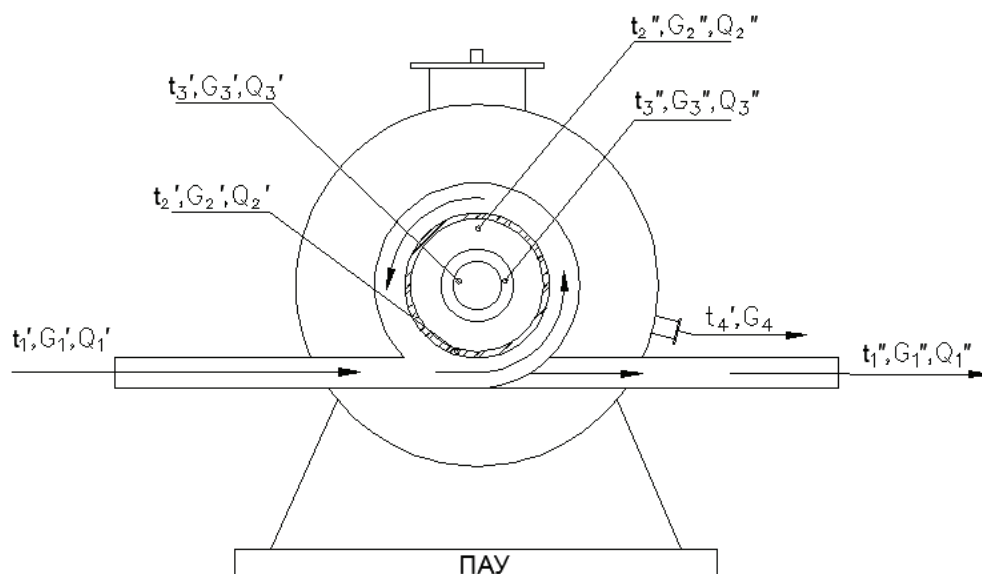
В связи с увеличением расхода теплоты от центральных тепловых пунктов и переходом части потребителей на индивидуальное отопление, необходимо научное и экономическое обоснование направлений повышения эффективности независимых систем отопления и горячего водоснабжения от подогревательно-аккумуляторных установок (ПАУ) с трехконтурными теплообменниками (ТО) змеевикового типа на индивидуальных тепловых пунктах (ИТП). Такие теплообменники должны иметь четкую градацию относительно соотношения их диаметра и длины конструкции в зависимости от тепловой нагрузки в системах отопления и горячего водоснабжения.

Опытно-экспериментальный стенд позволяет проводить исследования многоконтурных теплообменников с целью их оптимизации для зданий различной конструкции, назначения и этажности. В данном случае проводятся исследования ПАУ с многоконтурным ТО змеевикового типа как для независимой системы отопления, так и для системы горячего водоснабжения.

Оба змеевика размещены в корпусе ТО отдельно, как показано на рисунке 1. При установившихся расходах и температурах теплоносителей производится снятие показаний параметров греющего и нагреваемых теплоносителей второго и третьего контуров. Для минимизации влияния случайных погрешностей и увеличения точности измерений опыты дублировались и заносились в журнал наблюдений. Таким образом, были определены полнота использования переноса теплоты между теплоносителями и полнота использования ее термической, энергетической, механической и гидродинамической полезности.

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПУТЕЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА**

Исследование теплообменников змеевикового типа производилось в лабораторных условиях по методике, описанной в [7].



**Рисунок 1** – Направление движения теплоносителей в ПАО с трехконтурным ТО змеевикового типа для независимых систем отопления и горячего водоснабжения.

В задачу исследований змеевикового теплообменника входило:

- определение температуры нагреваемой воды на выходе из теплообменника в зависимости от скорости ее протекания по межтрубному пространству змеевикового теплообменника;
- определение значений коэффициентов теплопередачи в зависимости от изменения скорости воды в змеевиках отопительного контура и системы горячего водоснабжения;
- определение оптимальных диаметров трубок змеевиков для систем ОВ и ГВ для достижения наиболее эффективного теплообмена  $D_2/D_3 = f(G_2, G_3)$ ;
- определение величины возможного уменьшения поверхности нагрева подогревателя по сравнению с конструкцией ВТИ за счет интенсификации теплообмена в змеевиках отопления и ГВС при одной и той же тепловой нагрузке;
- возможность использования трехконтурных ТО змеевикового типа для саморегулируемых систем горячего водоснабжения и отопления;
- влияние изменения температуры сетевой воды на эффективность теплообмена в трехконтурном теплообменнике змеевикового типа.

Важным вопросом при движении сетевой воды является сохранение равенства скоростей закручивающего потока  $\omega_1$  с расходом  $G_1$  по межтрубному пространству при значительных скоростях в контурах змеевиков для водопроводной воды и системы отопления ( $\omega_3 \approx \omega_2$ ) с расходами  $G_3$  и  $G_2$ .

На рисунке 1 приведена саморегулируемая система теплоснабжения от ИТП и ТО змеевикового типа для независимых систем отопления и горячего водоснабжения.

Опытно-экспериментальный стенд позволяет проводить исследования многоконтурных ТО с целью их оптимизации конструкции для зданий различного назначения и этажности.

В данном случае приведены исследования ПАО с многоконтурным ТО змеевикового типа как для независимой системы отопления, так и для системы горячего водоснабжения.

Оба змеевика размещены в корпусе ТО раздельно, как показано на рисунке 1. При установившихся расходах и температурах теплоносителей производится снятие показаний параметров греющего и нагреваемых теплоносителей второго и третьего контуров. Для увеличения точности измерений опыты дублировались и заносились в журнал наблюдений.

Таким образом, были определены полнота переноса теплоты между теплоносителями и полнота использования ее термической, энергетической, технической и гидродинамической полезности.

Создание компактных ПАО с трехконтурными ТО змеевикового типа для ИТП становится определяющим в решении важной проблемы энергоресурсосбережения в системах централизованного теплоснабжения.



Для обеспечения эффективной работы теплообменников необходимо осуществить максимальный перенос тепловой энергии от первичного теплоносителя  $G_1$  к вторичным, циркулирующим в независимых змеевиках системы отопления  $G_2$  и горячего водоснабжения  $G_3$ .

Энергетический баланс ПАУ с теплообменником змеевикового типа, согласно рисунка 1, можно записать в виде уравнения:

$$Q_1' = Q_2' + Q_3' + Q_{\text{тп}}, \quad (1)$$

где  $Q_2'$  – количество теплоты, передаваемое первичным теплоносителем в местную систему отопления, кДж/кг;

$$Q_2' = G_2' \cdot C_{p2}(\tau_1' + \tau_2''), \quad (2)$$

$Q_3'$  – количество теплоты, передаваемое первичным теплоносителем в местную систему горячего водоснабжения, кДж/кг;

$$Q_3' = G_3' \cdot C_{p3}(\tau_1' + \tau_3''), \quad (3)$$

$Q_{\text{тп}}$  – тепловые потери в окружающую среду, можно принять для ПАУ с ТО змеевикового типа

$$Q_{\text{тп}} = 0,01Q_1. \quad (4)$$

Расчетные расходы первичного теплоносителя  $\Sigma G_1'$ , на отопление  $G_2'$  и горячее водоснабжение  $G_3'$  определяются из уравнений (1, 2, 3, 4) и приведены в таблице.

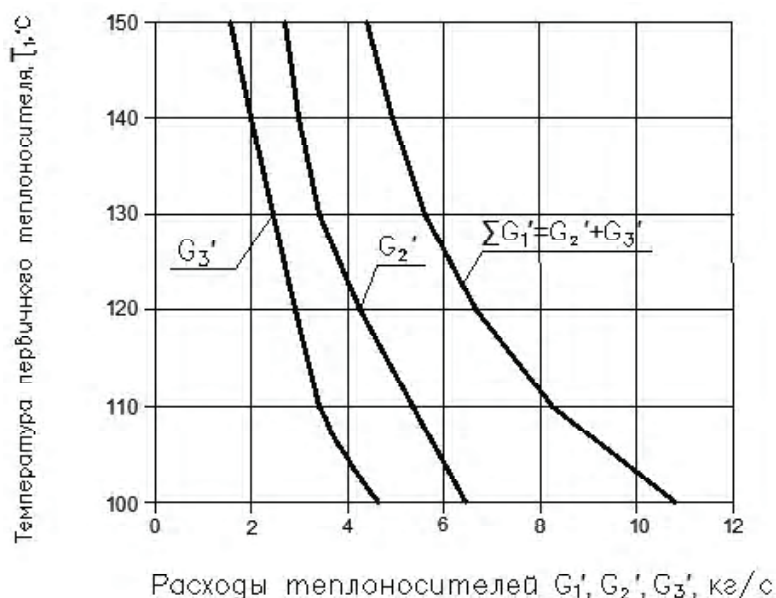
Теплота, воспринимаемая теплоносителем, циркулирующем в отопительном контуре, кДж/с:

$$Q_2' = G_2' \cdot C_{p20}(\tau_1' + \tau_2''). \quad (5)$$

Теплота, воспринимаемая водопроводной водой для системы горячего водоснабжения, кДж/с  $Q_3'$ :

$$Q_3' = G_3' \cdot C_{p30}(\tau_1' + \tau_3''). \quad (6)$$

По результатам исследований, приведенных в таблице, были построены зависимости расходов первичного теплоносителя от его температуры для нагревания расчетных расходов вторичных теплоносителей на отопление и горячее водоснабжение, представленных на рисунке 2. Представленные кривые наглядно показывают влияние температуры первичного теплоносителя и его расхода в теплообменниках змеевикового типа для независимых систем отопления и ГВС.



**Рисунок 2** – Зависимость расходов первичного теплоносителя от его температуры при нагревании расчетных расходов на отопление и горячее водоснабжение.

Таблица – Результаты исследований ПАУ с ТО змеевикового типа для ОБ и ГВС

№ п/п	Расходы, кг/с			Перепад температур, °C			Количество теплоты, кДж/с			Коэф. теплопроводности	Скорость, м/с		
	$\Sigma G'_1$ , кг/с	$G'_2$ , кг/с	$G'_3$ , кг/с	$\Delta\tau_1$ , °C	$\Delta\tau_2$ , °C	$\Delta\tau_3$ , °C	$Q'_1$ , кДж/с	$Q'_2$ , кДж/с	$Q'_3$ , кДж/с	$K$ , Вт/м <sup>2</sup> ·°C	$\omega'_1$ , м/с	$\omega'_2$ , м/с	$\omega'_3$ , м/с
m = 100 m = 10	4,08	2,34	1,74	80	25	50	1 370	786	584		2,08	0,374	0,278
	0,408	0,234	0,174	80	25	50	137	78,6	58,4		0,408	0,491	0,354
	$F = 3,636 \text{ м}^2; F_{om} = 11,63 \text{ м}^2; F_{me} = 4,32 \text{ м}^2$												
$\tau \approx 150/70$	4,08	2,34	1,74	80	25	50	1 370	786	584	4 702	2,080	1,194	0,888
	2,04	1,17	0,87	80	25	50	685	393	292	2 355	1,041	0,596	0,444
	1,02	0,586	0,434	80	25	50	343	179	146	1 179	0,520	0,298	0,222
	0,51	0,293	0,217	80	25	50	172	98,5	73	591	0,260	0,149	0,111
	0,255	0,146	0,109	80	25	50	86	49,25	37	296	0,130	0,075	0,056
$\tau \approx 130/70$	5,44	3,12	2,32	60	25	50	1 370	786	584	6 280	2,775	1,592	1,184
	2,72	1,56	1,16	60	25	50	685	393	292	3 140	1,388	0,796	0,592
	1,36	0,78	0,58	60	25	50	343	197	146	1 572	0,694	0,398	0,296
	0,68	0,39	0,29	60	25	50	172	98,5	73	788	0,347	0,199	0,148
	0,34	0,195	0,145	60	25	50	86	49,25	37	394	0,174	0,099	0,074
$\tau \approx 110/70$	8,16	4,68	3,48	40	25	50	1 370	786	584	9 420	4,163	2,387	1,775
	4,08	2,34	1,74	40	25	50	685	393	292	4 710	2,082	1,194	0,888
	2,04	1,17	0,87	40	25	50	343	197	146	2 355	1,041	0,596	0,444
	1,02	0,586	0,435	40	25	50	172	98,5	73	1 177	0,520	0,296	0,222
	0,51	0,293	0,218	40	25	50	86	49,25	37	589	0,26	0,149	0,111
$\tau \approx 100/70$	10,87	6,24	4,63	30	25	50	1 370	786	584	12 560	5,546	3,183	2,362
	5,44	3,12	2,32	30	25	50	685	393	292	6 280	2,775	1,592	1,181
	2,72	1,56	1,16	30	25	50	343	197	146	3 140	1,388	0,796	0,591
	1,36	0,78	0,58	30	25	50	172	98,5	73	1 570	0,694	0,398	0,296
	0,68	0,39	0,29	30	25	50	86	49,25	37	785	0,347	0,199	0,148

Теплопроизводительность трехконтурного ТО змеевикового типа во многом зависит от конструктивных его особенностей, т. е. диаметров трубок и змеевиков, а также закручивания теплоносителя в межтрубном пространстве корпуса ТО (тангенциальный вход и выход).

На рис. 3 приведены значения теплопроизводительности змеевикового ТО при изменении его расхода и скорости теплоносителя в межтрубном пространстве. Табличные данные позволяют определить расходы и скорости  $\omega'_2$  и  $\omega'_3$  в змеевиках контуров систем отопления и ГВС.

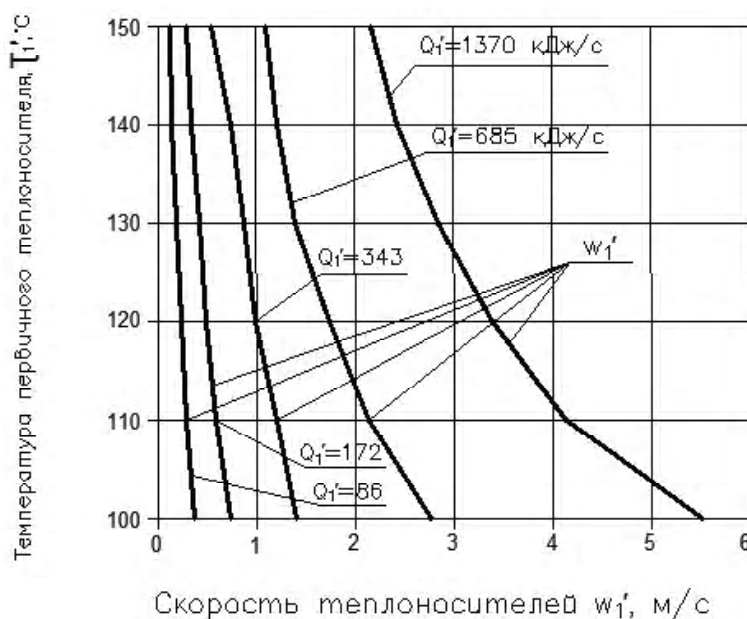
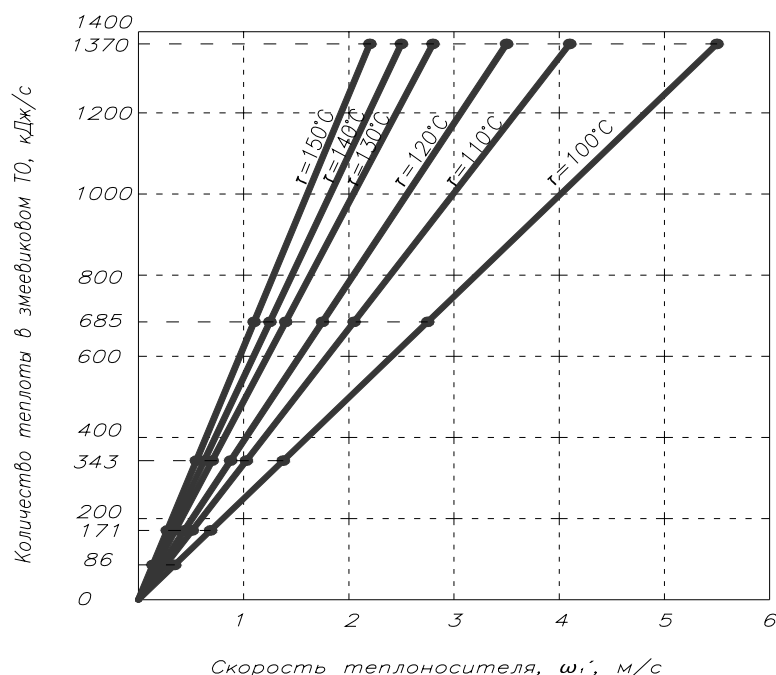


Рисунок 3 – Влияние скорости и температуры теплоносителя в межтрубном пространстве змеевикового ТО на его теплопроизводительность.

Влияние расчетных параметров теплоносителя на скорость нагрева теплоносителей в змеевиках для независимых систем отопления и горячего водоснабжения представлены на рисунке 4.



**Рисунок 4** – Влияние расчетных параметров теплоносителя на скорость нагрева теплоносителей в змеевиках систем ОВ и ГВС.

Используя новую конструкцию змеевикового ТО для систем индивидуального или централизованного теплоснабжения от ИТП с ПАУ, можно добиться увеличения теплопроизводительности за счет интенсификации теплообмена при одной и той же поверхности нагрева змеевиков для независимых систем отопления и горячего водоснабжения.

Кроме того, применение змеевиков позволяет упростить эксплуатацию и обслуживание, т. к. каждый змеевик соединен со своим торцевым фланцем. Змеевик системы отопления выполнен большего диаметра, а змеевик системы горячего водоснабжения выполнен меньшим диаметром, который свободно входит внутрь змеевика системы отопления, но с противоположной стороны, соединенным с правым фланцем теплообменника.

Рассмотрим значение коэффициентов теплопередачи при изменении температуры и скорости теплоносителя в трехконтурном теплообменнике змеевикового типа для независимых местных систем отопления и ГВС, представленных на рис. 5.

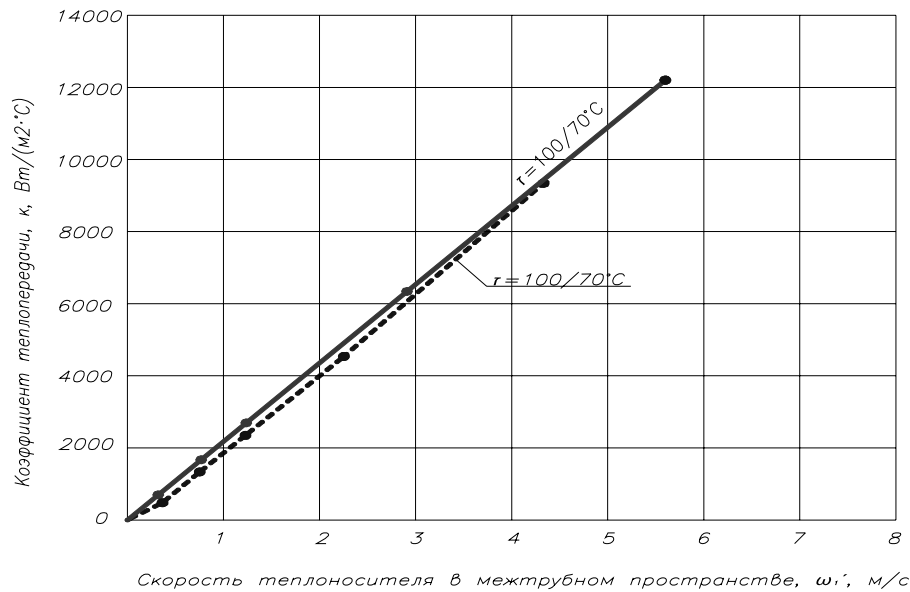
Ввиду того, что первичный теплоноситель омывает поверхности змеевиков большего и меньшего диаметров ( $F_{от} = 11,63 \text{ м}^2$  и  $F_{гв} = 4,32 \text{ м}^2$ ) для систем отопления и горячего водоснабжения со всех сторон, поэтому скорость теплоносителя усредняется по межтрубному пространству ТО.

Скорость нагреваемых теплоносителей в змеевиках большего и меньшего диаметров ( $\omega_2'$  и  $\omega_3'$ ) зависят от величины их расходов ( $G_2'$  и  $G_3'$ ).

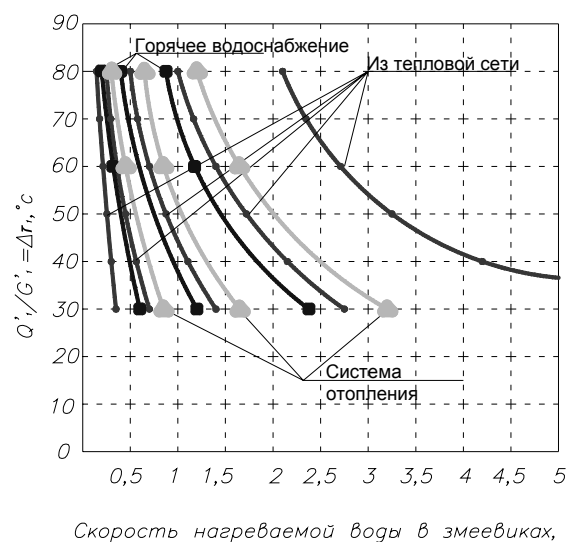
Из графиков, приведенных на рисунке 6, видно, как изменяются расходы теплоносителей в тепловой сети,  $G_1'$ , в системе отопления  $G_2'$  и горячего водоснабжения  $G_3'$ , кг/с.

## ВЫВОДЫ

Экспериментальные исследования путем увеличения эффективности теплообмена в ПАУ с трехконтурным теплообменником змеевикового типа позволили установить влияние конструктивных особенностей ТО на полноту переноса теплоты от первичного теплоносителя к двум вторичным через поверхности нагрева змеевиков, а также определить оптимальные диаметры змеевиков и скорости теплоносителей в них. Оптимальные диаметры трубок для изготовления змеевиков находятся в пределах от 15 до 32 мм, а диаметры корпусов змеевиков, соответственно, для системы отопления 200...250 мм и горячего водоснабжения 150...200 мм, чтобы один змеевик свободно входил в корпус другого, связанных с противоположными торцевыми фланцами теплообменника в ПАУ.



**Рисунок 5** – Значення коефіцієнтів теплопередачі в ТО змеевикового типу при зміні температури і швидкості первинного теплоносія  $k = f(\omega_1)$ .



**Рисунок 6** – Вплив зміни температури теплоносія  $\Delta\tau_1$  на температуру нагріву вторинних теплоносієв  $\Delta\tau_2$  і  $\Delta\tau_3$  для систем опалення ГВС.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Олексюк, А. А. Математическая модель расчета теплообменников змеевикового типа для независимых систем отопления и горячего водоснабжения [Текст] / А. А. Олексюк, И. Г. Шитикова, А. А. Горделюк // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – Макіївка : Вид-во ДонНАБА, 2012. – Вип. 2012-2(94) : Інженерні системи та техногенна безпека. – С. 70–75.
2. Олексюк, А. А. Конструктивный расчет теплообменника змеевикового типа для систем отопления и горячего водоснабжения [Текст] / А. А. Олексюк, И. Г. Шитикова, А. А. Горделюк // Сучасне промислове та цивільне будівництво. – 2012. – Т. 8, № 1. – С. 37–44.
3. Олексюк, А. О. Створення енергоресурсосберігаючих систем геотермального теплопостачання з використанням сонячної енергії та теплових насосів [Текст] / А. О. Олексюк, С. О. Чепалко, А. А. Горделюк // Вісті автомобільно-дорожнього інституту. – Горлівка : Вид-во АДІ, 2011. – № 1(12). – С. 143–150.
4. Олексюк, А. О. Оптимізація енергоресурсосберігаючих установок для геотермального теплопостачання житлових і громадських будинків [Текст] / А. О. Олексюк, С. О. Чепалко // Вісті автомобільно-дорожнього інституту. – Горлівка : Вид-во АДІ, 2010. – № 2(11). – С. 140–144.

5. Олексюк, А. О. Методика розрахунку триконтурних ТО для незалежних систем опалення та гарячого водопостачання [Текст] / А. О. Олексюк, С. О. Чепалко // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання : наук. техн. зб. – К. : Вид-во КНУБА, 2009. – Вип. 13. – С. 13–18.
6. Олексюк, А. А. Математическая модель процессов тепломассообмена в трехконтурных ТО с аккумулятором теплоты [Текст] / А. А. Олексюк, Н. В. Долгов // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – Мakiївка : Вид-во ДонНАБА, 2010. – Вип. 2010-6(86) : Інженерні системи та техногенна безпека. – С. 123–30.
7. Установки з незалежним приєднанням систем опалення та гарячого водопостачання за допомогою три контурних ТО та вибір оптимальних параметрів [Текст] / А. О. Олексюк, М. В. Долгов, Н. А. Максимова, А. А. Горделюк // Сучасне промислове та цивільне будівництво. – 2011. – Т. 7, № 1. – С. 43–50.
8. Олексюк, А. А. Саморегулирующие энергоресурсосберегающие системы теплоснабжения от индивидуальных тепловых пунктов с подогревательно-аккумуляторными установками для независимых систем отопления и горячего водоснабжения ЖКХ городов Украины [Текст] / А. А. Олексюк, М. В. Долгов // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – Мakiївка : Вид-во ДонНАБА, 2011. – Вип. 2011-5(91) : Інженерні системи та техногенна безпека. – С. 87–92.

Получено 30.09.2015

**А. О. ОЛЕКСЮК, І. Г. ШИТІКОВА**  
**ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ**  
**ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ВІД ІНДИВІДУАЛЬНИХ ТЕПЛОВИХ ПУНКТІВ З**  
**ПІДІГРІВАЛЬНО-АКУМУЛЯТОРНИМИ УСТАНОВКАМИ ЗА ДОПОМОГОЮ**  
**ТЕРМІЧНОГО Й ЕНЕРГЕТИЧНОГО БАЛАНСІВ**  
**Донбаська національна академія будівництва і архітектури**

Розглянуто саморегульовану систему теплопостачання від ІТП з підігрівально-аккумуляторною установкою з теплообмінниками змієвидного типу для незалежних систем опалення та гарячого водопостачання. Термодинамічна ефективність роботи теплообмінних апаратів залежить від багатьох параметрів та факторів, таких як: теплова потужність, витрата та якість теплової ізоляції. Енергетичний метод дозволяє дати оцінку повного використання переносу теплоти між теплоносіями й оцінкою повноти використання її термічної, енергетичної, механічної й гідродинамічної корисності.

**підігрівально-аккумуляторна установка, триконтурний теплообмінник, система незалежного теплопостачання**

**ANATOLIY OLEKSYUK, IRINA SHYTIKOVA**  
**PERFORMANCE EVALUATION OF HEAT SUPPLY SYSTEM OPERATED FROM**  
**INDIVIDUAL HEATING PLANTS WITH REGENERATING ACCUMULATOR**  
**UNITS**  
**Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture**

The self-regulating heat supply system operated from the individual heating plants with the regenerating accumulator units and the coil heat exchanger for the independent heating and hot water supply system has been considered. Thermodynamic operation efficiency of the heat exchangers depends on many parameters and factors such as heat power, loss and quality of the heat exchanger, industrial use and design, direction flow of the heat exchangers, availability and quality of heat insulation. The exergetic method provides both the full use of the heat transfer between the heat exchangers and the full use of its thermal, energetic, mechanical and hydrodynamical utility.

**reheating accumulator units, triple circuit heat exchanger, independent heat supply system**

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

**Шитикова Ірина Геннадіївна** – здобувач наукового ступеня. Викладач Донецького коледжу будівництва та архітектури. Наукові інтереси: енергоресурсоощаднення 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** – соискатель ученой степени. Преподаватель Донецкого колледжа строительства и архитектуры. Научные интересы: энергоресурсосбережение в системах ТГВ.

**Oleksyuk Anatoliy** – D.Sc. (Eng.), Professor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, a 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 many contours transformations.

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

УДК 628.328

**М. С. ДЕРЕВЯНКО**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## **ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ СООРУЖЕНИЙ ПО ИЛООТДЕЛЕНИЮ СВОБОДНОПЛАВАЮЩЕГО АКТИВНОГО ИЛА НА СОСТАВ ОЧИЩАЕМЫХ СТОЧНЫХ ВОД**

Рассмотрены причины нарушения процессов илоотделения активного ила от осветленной сточной жидкости при работе очистных сооружений канализации. Даны рекомендации по использованию тонкослойных пульсационных илоотделителей и приведены особенности их работы.

**тонкослойный пульсационный илоотделитель, активный ил, число Рейнольдса, иловый индекс**

Разделение иловых смесей осуществляется, как правило, в поле гравитационных сил, реже центробежных и, совсем редко, фильтрацией. Причиной тому являются свойства иловых частиц свободноплавающего низконагруженного нитри- денитрифицирующего активного ила.

Гидравлическая крупность частиц свободноплавающего активного ила находится в пределах 0,5–1,2 мм/с, у оторвавшейся биопленки биофильтров до 1,4 мм/с. Исходя из гидравлической крупности иловых частиц и глубины отстойников (до 3–4 м) назначается время осветления и нагрузка на зеркало воды вторичных отстойников различной модификации (вертикальных, горизонтальных и радиальных). Время отстаивания – не менее 1,5 часов, нагрузка на зеркало воды – не более  $2 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  (обычно  $1,5 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ).

Ряд нюансов по эффективности отстаивания связан со следующими факторами:

- с нагрузкой на водослив;
- с иловым индексом активного ила;
- с параметрами выпускных устройств иловых смесей из аэротенков (захватом воздуха);
- с содержанием в очищенной воде нитратов и наличием на дне горизонтальных и радиальных отстойников залежей гниющего ила, а в вертикальных отстойниках – с пирамидальным и коническим устройством днища, их шероховатых поверхностей, затрудняющих сползание осевшего ила к патрубку отвода активного ила из вторичного отстойника.

Все эти недостатки конструкций создают предпосылки к появлению всплывающих комьев активного ила, его гниению и, как следствие, росту содержания взвешенных веществ, БПК<sub>полн</sub>, азота аммонийного, нитритов и фосфатов в очищенной сточной жидкости.

Несколько обособленно в этом перечне располагаются тонкослойные отстойники. Несмотря на наличие целого ряда диссертационных работ, оригинальных технических решений по конструктивному оформлению тонкослойных илоотделителей, они не нашли широкого практического применения в практике биологической очистки городских и промышленных сточных вод. В то же время перспектива их использования высокая. Небольшое время пребывания в отстойном сооружении (2–3 минуты), не приводящее к изменению физических характеристик иловых частиц, физиологического состояния биоценоза активного ила, обуславливает интерес в дальнейшем совершенствовании конструкции тонкослойных илоотделителей.

В известных учебниках по канализации [1–3] и в отдельных статьях [4, 6] отмечается, что в вертикальных и горизонтальных отстойниках практически невозможно получить качество осветленной сточной жидкости с содержанием взвешенных веществ и БПК<sub>полн</sub> менее 15 мг/л. После радиальных отстойников, особенно большого диаметра, получены значения БПК<sub>полн</sub> и взвешенных веществ на

уровне до 5 мг/л. Лучше обстоит дело и с содержанием в очищенной и отстаиванной в радиальных отстойниках сточной жидкости азота и нитритов. Однако диапазон применения радиальных отстойников – это расходы свыше 20 тысяч кубических метров сточной жидкости в сутки, т. е. если речь идет об очистных станциях крупных городов.

В тонкослойных отстойниках отдельными специалистами получены значения величин концентраций взвешенных веществ и БПКполн на уровне 6–10 мг/л, азот аммонийный, нитритов и нитратов оставался на уровне значений, получаемых в фильтрате иловой смеси аэротенков [2].

Из двух возможных конструкций тонкослойных илоотделителей для иловых смесей на практике положительно зарекомендовали себя только тонкослойные отстойники с противоточным движением осветляемой воды и отделяемого активного ила. Сложность удаления иловой смеси из поддона тонкослойного модуля при перекрестном движении воды и активного ила с учетом своеобразия физических свойств биоценоза свободноплавающего активного ила перечеркивает все достоинства перекрестной схемы. Поэтому в дальнейшем речь будет идти только о противоточной схеме движения воды и активного ила в тонкослойных илоотделителях.

Другим важным параметром при использовании тонкослойных илоотделителей является концентрация биомассы свободноплавающего активного ила по сухому веществу в иловой смеси, поступающей из аэротенков и удаляемой из поддона тонкослойного илоотделителя назад в аэротенк или на сгущение, когда речь идет об избыточном активном иле.

На тонкослойные илоотделители нежелательно подавать концентрацию активного ила более 2,5 кг/м<sup>3</sup> по сухому веществу и сгущать в поддоне до концентрации более 4 кг/м<sup>3</sup>. Эти условия являются ограничением при доведении расстояния между полками тонкослойных модулей до 50 мм и менее.

Но эти же величины концентраций желательны и по условиям стабильной работы нитри- денитрифицирующих биоценозов второй иловой системы.

При отстаивании воды в тонком слое с расстоянием между плоскостями, разделяющими зону отстаивания на параллельные слои, не менее 25 мм, обусловленными поверхностными эффектами воздействия на примеси сточных вод, турбулентность потока и неравномерность распределения потоков воды по объему сооружений устраняются при определенных параметрах потоков суспензий взвешенных веществ в водных смесях. Значительными при этом становятся скорость движения иловых смесей, межполочное расстояние и концентрация взвешенных веществ в потоке иловой смеси. Несомненно, большое значение имеет инертность поверхностей полок по отношению к иловым частицам, т. к. наличие сил адгезии иловых частиц к поверхности полок отстойника тормозит сползание ила под действием сил гравитации (рисунок).

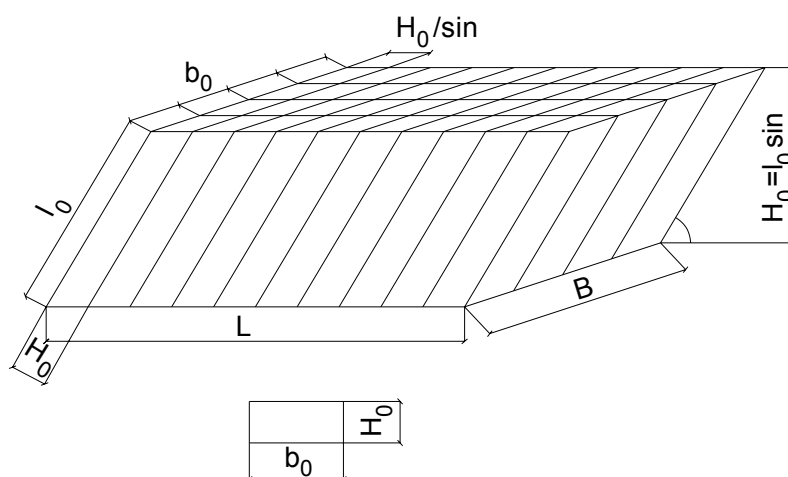


Рисунок – Конструктивные параметры тонкослойных элементов в блоке.

При седиментации иловых частиц с гидравлической крупностью  $U_0$  в слое жидкости при межполочном расстоянии  $H_0$  и угле наклона пластин к горизонту  $\alpha$  величина

$$H = L_0 \cdot \cos \alpha. \quad (1)$$



Тогда продолжительность отстаивания равна:

$$T = H / (U_o \cdot \cos \alpha). \quad (2)$$

Объемный расход иловой смеси ( $Q$ ) равен произведению площади ( $\omega$ ) живого сечения полочного пространства на скорость потока ( $V$ )

$$Q = \omega \cdot V, \quad (3)$$

где площадь живого сечения определяется из произведения ширины полочного сечения ( $b_0$ ) и количества полок ( $n$ ), умноженного на величину  $h$ ,

$$Q = b_0 \cdot n \cdot H_o \cdot V. \quad (4)$$

Тогда величина  $b_0$  может быть найдена по соотношению

$$b_0 = Q / (n \cdot H_o \cdot V). \quad (5)$$

Скорость потока  $V$  рекомендуется устанавливать, ориентируясь на число Рейнольдса. Однако в литературе для иловых смесей есть разночтение в величине критического значения числа Рейнольдса [5]. Большинство ученых-практиков дает интервал критической величины числа Рейнольдса 100–250, но не исключает возможность доведения его значения до 500.

Из равенства

$$Re = V \cdot h / \nu, \quad (6)$$

в котором  $Re$  – число Рейнольдса,  $V$  и  $h$  уже обозначены, а  $\nu$  – кинематическая вязкость иловых частиц, чаще равна  $1 \text{ мм}^2/\text{с}$ , в интервале температур  $14\text{--}21 \text{ }^\circ\text{C}$ , при которых работает активный ил. Отсюда, если принять  $h = 50 \text{ мм}$ , а число  $Re = 250$ , то  $V = 5 \text{ мм/с}$ .

Площадь зеркала воды  $F$  в полочном отстойнике равна произведению

$$F = B \cdot L, \quad (7)$$

поэтому производительность тонкослойного отстойника площадью зеркала воды  $F$  будет равна

$$Q = b_0 \cdot n \cdot H_o \cdot V = V \cdot F \cdot \cos \alpha. \quad (8)$$

Учитывая размерность подставляемых в формулу (8) величин:  $F$  (в  $\text{м}^2$ );  $V$  (в  $\text{мм/с}$ ), а также соотношение 1:1 ширины потока осветленной воды, движущейся вверх, к ширине потока ила, движущегося вниз (при концентрации ила в иловой смеси аэротенка на уровне  $2 \text{ г/л}$  и концентрации ила в потоке возвратного ила  $4 \text{ г/л}$ ),

$$Q = 3,6 \cdot K_{\text{set}} \cdot F \cdot V \cdot \cos \alpha. \quad (9)$$

Для биоценоза второй иловой системы величина илового индекса ( $J$ ) колеблется в пределах от 60 до 130  $\text{мл/ч}$  и величина  $U_o$ , обеспечивающая выделение в осадок иловых частиц до их остаточной концентрации на уровне  $5\text{--}10 \text{ мг/л}$  в осветленной воде, должна быть принята равной  $0,5 \text{ мм/с}$ . Тогда при  $H_o = 50 \text{ мм}$  и  $\alpha = 60^\circ$   $h = H_o / \cos 60^\circ = 100 \text{ мм}$ .

Для скорости  $0,5 \text{ мм/с}$  продолжительность движения  $t = 100 \text{ мм} : 0,5 \text{ мм/с} = 200 \text{ с}$ , а значит, длина пути иловой частицы в полочном пространстве должна быть не менее

$$l_0 = t \cdot V = 200 \cdot 0,5 = 100 \text{ мм},$$

чтобы частица успела достигнуть нижележащей полки.

При таких соотношениях размеров полок и площади зеркала воды в тонкослойном отстойнике нагрузка ( $f$ ) на зеркало воды ( $F$ ) составит

$$f = 3,6 \cdot K_{\text{set}} \cdot V \cdot \cos \alpha = 3,6 \cdot 0,5 \cdot 5 \cdot 0,866 = 7,7 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}),$$

что в 5 раз выше, чем в радиальных отстойниках.

Следовательно, время пребывания иловой смеси в тонкослойных отстойниках по меньшей мере в 5 раз меньше, чем в радиальных, т. е. не более  $0,3\text{--}0,4$  часа. Но фактически, поскольку длина полок всего  $1 \text{ м}$ , а далее идет пирамидальный поддон и скорости движения ила возрастают, то время пребывания ила в тонкослойном модуле уменьшается до 10 минут. Препятствием к бесперебойной работе тонкослойных илоотделителей является наличие адгезионных свойств у любых поверхностей пластин. Если пластины будут гидрофильными, то сработает гидрофильность агрегатов иловых

частиц, если пластины будут гидрофобными, то у бактериальных клеток клеточная мембрана – гидрофобная, и постепенно на пластинах начинается закрепление то ли отдельных клеток, то ли клеточных агрегатов.

Для снижения обрастания пластин и подталкивания клеточных агрегатов к лавинному сползанию вниз по поверхности полок в мировой практике используется метод периодического резкого понижения уровня жидкости в полочном пространстве, огороженном боковыми водонепроницаемыми поверхностями от объема жидкости в аэротенке.

При площади зеркала воды в полочном пространстве зона понижения уровня воды должна быть увеличена на величину площади, занимаемой пазухами, где иловая смесь опускается сверху под полочное пространство, и площади зеркала воды, получаемой от горизонтальной проекции крайней полки полочного пространства,

$$F = F_3 + 0,5 \cdot F_{\text{пол}} + F_{\text{паз}}. \quad (10)$$

Площадь пазух ( $F_{\text{паз}}$ ) может быть найдена по соотношению

$$F_{\text{паз}} = 2 Q / 54, \quad (11)$$

где 54 м/час, скорость движения иловой смеси, гарантирующая в течение 2–3 минут агломерацию иловых частиц в клоны с проектной гидравлической крупностью и выделение пузырьков воздуха, захваченных иловыми частицами в аэротенке;

$2Q$  – это расход иловой смеси, м<sup>3</sup>/ч, поступающей на илоразделение в тонкослойный илоотделитель. Ориентировочно

$$F_3 = 2 \cdot F. \quad (12)$$

Пульсационное понижение уровня воды должно протекать в течение 3–5 секунд на величину 10–15 см. Следовательно, объем бака пульсатора, который должен принять понижающийся слой иловой смеси составит:

$$W_n = 0,1 - 0,15 F_3. \quad (13)$$

С учетом запаса, отводимого на размещение в баке пульсатора гидрозатвора,

$$W_{n_1} = 1,5 \cdot (0,1 - 0,15) F_3 \approx 0,2 \cdot F_3. \quad (14)$$

Труба, соединяющая бак пульсатора с поддоном тонкослойного илоотделителя, должна обеспечить пропуск объема воды пульсации со скоростью не более 3 м/с.

Бак пульсатора, медленно опорожняющийся от иловой смеси после очередного срабатывания гидрозатвора, должен находиться ниже уровня иловой смеси в аэротенке и быть присоединенным к воздуховодам, обеспечивающим барботаж иловой смеси в аэротенках.

Промежуток времени между срабатываниями пульсатора составляет около 0,5 часа, а продолжительность перерыва восстановления проточности воды в тонкослойном модуле не более 1 минуты, поэтому повышение нагрузки на тонкослойный илоотделитель от выдавливаемого из бака пульсатора расхода иловой смеси незначительно и существенно не сказывается на величине гидравлической нагрузки на полочное пространство тонкослойного илоотделителя:

$$Q_n = 1,033Q. \quad (15)$$

Периодическое лавинообразное скатывание иловых частиц с полок замедляет, но не исключает их заиливание, поэтому требуются более жесткие меры по срыванию иловых частиц с полок.

Такой жесткой мерой служит интенсивный барботаж иловой смеси в полочном пространстве в часы минимального притока сточных вод на очистную станцию, когда можно вообще прекратить подачу иловой смеси на тонкослойный пульсационный илоотделитель на непродолжительное время, перекрыв шибер на подающем лотке иловой смеси.

Регенерационный барботаж иловой смеси в полочном пространстве выполняется 2 раза в неделю с продолжительностью подачи воздуха до 10 минут. Для равномерности регенерации полочного пространства шаг размещения барботажных перфорированных труб под полочным пространством должен быть не более 0,3 м, а их расположение должно быть не менее, чем на 0,3 м ниже низа полок полочного пространства тонкослойного илоотделителя. Барботажные трубы должны быть установлены в плане перпендикулярно нижней кромке полок и иметь шаг перфорации в каждую сторону от лотка трубы – 50 мм. Диаметр перфораций – 3 мм.

Наличие пульсаторов уровня воды в полочном пространстве барботажной регенерации поверхности полок предъявляет дополнительные требования к прочности креплений полок и их жесткости. Форма полок не имеет существенного значения для илоотделения, однако при пульсации может способствовать управляемому движению потока лавины, если выполнена волнистой. С другой стороны, при прямолинейных пластинах полка лавина ила может увлекать за собой иловые частицы соседних участков поверхности.

Чрезвычайно важную роль в стабильности работы ТПИ играет исключение струйных потоков иловой смеси от нисходящих впусков по пазухам. Впуски по пазухам обязательно должны осуществляться с противоположных сторон полочного пространства в равных количествах с равными гидродинамическими параметрами. При движении потоков навстречу друг другу они взаимно гасятся и не сказываются на эффективности илоразделения и нагрузках в межполочных отсеках.

Таким образом, постоянное обновление поверхности полок, исключаящее их биообрастание толстым слоем, внутри которого могут протекать неуправляемые процессы денитрификации, сопровождающиеся увеличением количества нитритов, и выноса взвешенных веществ с очищенной сточной жидкостью, способствует стабилизации качества очищенной воды. Тонкослойный пульсационный, постоянно регенерируемый илоотделитель не только имеет в 5 раз меньший объем сооружения, но и гарантирует стабильный уровень качества осветляемой сточной жидкости.

Другое преимущество тонкослойных илоотделителей состоит в сокращении продолжительности пребывания иловой смеси за пределами аэрируемой зоны.

Если при сгущении активного ила концентрация сухого вещества осадка будет не более  $4 \text{ кг/м}^3$ , сухого беззольного вещества будет не более  $3 \text{ кг/м}^3$ . При удельной скорости потребления растворенного в воде кислорода  $20 \text{ г O}_2/\text{кг беззольных веществ в час}$ , т. е.  $3 \cdot 20 = 60 \text{ г O}_2/(\text{час} \cdot \text{м}^3)$  за 10 минут, т. е.  $1/6$  часа, может поглотиться не более  $10 \text{ г O}_2/\text{м}^3$ .

На выходе из аэротенка концентрация растворенного в воде кислорода в иловой смеси не ниже  $5 \text{ г O}_2/\text{м}^3$ , если аэротенк работает в режиме глубокой нитрификации. Поэтому биоценоз аэробных микроорганизмов не более 5 минут будет находиться в условиях дефицита растворенного в воде кислорода, и угнетения физиологической активности гидробионтов происходить не будет, что отразится на окислительной мощности всей биомассы свободноплавающего активного ила аэротенков. Особенно это важно для наиболее уязвимой части свободноплавающего биоценоза активного ила аэротенков – гидробионтов третьего трофического уровня, фильтраторов-седиментаторов, определяющих содержание в осветленной сточной жидкости взвешенных веществ и величину БПК<sub>п</sub>, а также автотрофов, осуществляющих окисление азота аммонийного.

## ВЫВОДЫ

1. Рациональным является ступенчатое ведение процессов биологической очистки сточных вод с задействованием трехиловой системы биоценозов свободноплавающих и прикрепленных микроорганизмов от бактериальных сообществ до зоопланктона фильтраторов-седиментаторов.

2. Свободноплавающий биоценоз второй иловой системы с нитри- денитрифицирующими сообществами бактерий, простейшими и гидробионтами мелких животных нуждается в эффективно работающих илоотделителях, не влияющих на параметры качества очищенной в аэротенках сточной жидкости.

3. Для очистных сооружений диапазона малогабаритных очистных станций канализации и очистных станций средней производительности (до 50 тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$ ) целесообразно использование тонкослойных противоточных илоотделителей в качестве вторичных отстойников.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ДБН В.2.5-75:2013. Державні будівельні норми України. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування [Текст]. – На заміну СНиП 2.04.03-85 ; чинні від 2014-01-01. – Київ : Міністерство України, 2013. – 113 с.
2. Канализация населенных мест и промышленных предприятий [Текст] : справочное издание / Н. И. Лихачев [и др.] ; Под общ. ред. В. Н. Самохина. – М. : Стройиздат, 1981. – 638 с. : ил. – (Справочник проектировщика).
3. Проектирование сооружений для очистки сточных вод [Текст] / Всесоюз. комплекс. н.-и. и конструкт.-технолог. ин-т водоснабжения, канализации, гидротехн. сооружений и инж. гидрогеологии. – М. : Стройиздат, 1990. – 192 с. – (Справ. пособие к СНиП).
4. Куликов Н. И. Реконструкция работы городских канализационных очистных сооружений в целях интенсификации их работы с применением тонкослойных пульсационных илоотделителей в системе глубокой биологической очистки сточных вод // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2015. – № 5(115). – С. 110–115.

- ческой очистки сточных вод [Текст] / Н. И. Куликов, М. С. Деревянко, В. И. Нездойминов // Водопостачання та водовідведення : Виробничо-практичний журнал. – К. : «ВИМИ», 2008. – Вып. 4. – С. 37–40.
5. Химия [Текст] / гл. ред. И. Л. Кнунянц. – М. : Большая Российская Энциклопедия, 1998. – 418 с.
6. Использование модифицированной трехиловой системы биологической очистки сточных вод с тонкослойными пульсационными илоотделителями на очистных станциях различной производительности / Н. И. Куликов, Д. Н. Куликов, Е. Н. Куликова [и др.] // Новые технологии и оборудование в водоснабжении и водоотведении : Сборник материалов / РАВВ; НИИ коммунального водоснабжения и очистки воды. Водкоммунтех. – М. : ФГУП «ВИМИ», 2005. – Вып. 5. – С. 144–150.

Получено 25.09.2015

М. С. ДЕРЕВ'ЯНКО  
ВПЛИВ КОНСТРУКЦІЇ СПОРУД З МУЛОВІДОКРЕМЛЮВАННЯ  
ВІЛЬНОПЛАВАЮЧОГО АКТИВНОГО МУЛУ НА СКЛАД СТИЧНИХ ВОД,  
ЩО ОЧИЩУЮТЬСЯ

Донбаська національна академія будівництва і архітектури

Розглянуто причини порушення процесів муловідділення активного мулу від освітленої стічної рідини при роботі очисних споруд каналізації. Надано рекомендації з використання тонкошарових пульсацийних муловідділювачів і наведено особливості їх роботи.

**тонкошаровий пульсацийний муловідділювач, активний мул, число Рейнольдса, муловий індекс**

MIKHAIL DEREVYANKO  
INFLUENCE OF THE DESIGN OF CONSTRUCTIONS ACCORDING TO  
SEPARATION OF FREE-FLOATING ACTIVE SILT ON COMPOSITION OF THE  
CLEARED SEWAGE

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Reasons of violation of processes of separation of active silt are considered from a defecate sewer liquid during work of sewage treatment plants of the sewage system. Recommendations are given on the use of thin-layer modules with pulsation and features over of their work are brought.

**thin-layer modules with pulsation, active silt, Reynolds's number, fir-tree index**

**Дерев'яно Михайло Сергійович** – асистент кафедри водопостачання, водовідведення і охорони водних ресурсів Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: реконструкція та інтенсифікація роботи очисних споруд каналізації з використанням тонкошарових пульсацийних муловідділювачів.

**Деревянко Михаил Сергеевич** – ассистент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: реконструкция и интенсификация работы очистных сооружений канализации с использованием тонкослойных пульсационных илоотделителей.

**Derevyanko Mikhail** – assistant, Water Supply, Water Disposal and Water Resources Conservation and Protection Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: reconstruction and intensifications of work of treatment facilities of the sewerage with use of thin-layer modules with pulsation.

## ЗМІСТ

АНТОНЕНКО С. Є. Техніко-економічна оцінка експлуатації парових і жарогазотрубних теплогенераторів малої потужності з електрохімічною водопідготовкою	5
МАКСИМОВА Н. А., ШАЙХЕД О. В. Система кондиціонування житлового будинку з використанням артезіанської води	12
ЗЯТІНА В. І. Рух рідини у колоні освітлювача із завислим шаром осаду	16
МИХАЙЛОВ О. В. Оцінка міських територій та визначення факторів, що впливають на їх трансформацію	22
ОРЛОВ С. М., ОРЛОВА А. Я. Вплив статичної електрики на ефективність роботи циклону	29
НАЙМАНОВ А. Я., ТУРЧИНА Г. С. Надійність систем подачі та розподілу води як сукупність конструктивної та експлуатаційної надійності	36
ВИБОРНОВ Д. В., МОНАХ С. І. Економічна та екологічна ефективність ТНУ, що використовують теплоту шахтних вод	43
КОЛОСОВА Н. В., МОНАХ С. І. Оцінка викидів парникових газів при зберіганні відходів тваринницьких ферм	49
ЧЕРНИШЕВ В. М., ТИЩЕНКО О. І. Ступінь використання кисню при пневматичній аерації через рукавні тканинні аератори	53
НАЙМАНОВ А. Я., ТРЯКІНА А. С. Обґрунтування розрахункового складу води при виборі технологічної схеми очищення на підставі багаторічних спостережень	59
БАЛІНЧЕНКО О. Й. Установки зворотного осмосу для зменшення дефіциту води в Донбасі	68
ВИСОЦЬКИЙ С. П., СТЕПАНЕНКО Т. І. Осадження металів із стічних вод	75
ВИСОЦЬКИЙ С. П., ПИСАРЕНКО А. В. Шляхи вирішення питань будівництва в складних інженерно-геологічних умовах за допомогою хімічних розчинів	82
ПОДГОРОДЕЦЬКИЙ М. С. Забезпечення безпечної експлуатації обладнання, що працює під надлишковим тиском, шляхом підвищення ефективності ультразвукових методів контролю і діагностики	88
УДОВИЧЕНКО З. В., САВІЧ Д. В. Визначення поверхневих властивостей плівки теплоносія, що вертикально стікає, на основі водного розчину луку	93
ОЛЕКСЮК А. О., ШИТІКОВА І. Г. Економічна оцінка ефективності роботи системи теплопостачання від індивідуальних теплових пунктів з підігрівально-акумуляторними установками за допомогою термічного й енергетичного балансів	98
ДЕРЕВ'ЯНКО М. С. Вплив конструкції споруд з муловідокремлювання вільноплаваючого активного мулу на склад стічних вод, що очищуються	106

## СОДЕРЖАНИЕ

АНТОНЕНКО С. Е. Технико-экономическая оценка эксплуатации паровых и жарогазотрубных теплогенераторов малой мощности с электрохимической водоподготовкой	5
МАКСИМОВА Н. А., ШАЙХЕД О. В. Система кондиционирования жилого дома с использованием артезианской воды	12
ЗЯТИНА В. И. Движения жидкости в колонне осветлителя во взвешенном слое осадка	16
МИХАЙЛОВ А. В. Оценка городских территорий и определение факторов, влияющих на их трансформацию	22
ОРЛОВ С. М., ОРЛОВА А. Я. Влияние статического электричества на эффективность работы циклона	29
НАЙМАНОВ А. Я., ТУРЧИНА Г. С. Надежность систем подачи и распределения воды как совокупность конструктивной и эксплуатационной надежности	36
ВЫБОРНОВ Д. В., МОНАХ С. И. Экономическая и экологическая эффективность ТНУ, использующих теплоту шахтных вод	43
КОЛОСОВА Н. В., МОНАХ С. И. Оценка выбросов парниковых газов при хранении отходов животноводческих ферм	49
ЧЕРНЫШЕВ В. Н., ТИЩЕНКО О. И. Степень использования кислорода при пневматической аэрации через рукавные тканевые аэраторы	53
НАЙМАНОВ А. Я., ТРЯКИНА А. С. Обоснование расчетного состава воды при выборе технологической схемы очистки на основании многолетних наблюдений	59
БАЛИНЧЕНКО О. И. Установки обратного осмоса для уменьшения дефицита воды в Донбассе	68
ВЫСОЦКИЙ С. П., СТЕПАНЕНКО Т. И. Осаждение металлов из сточных вод	75
ВЫСОЦКИЙ С. П., ПИСАРЕНКО А. В. Пути решения вопросов строительства в сложных инженерно-геологических условиях при помощи химических растворов	82
ПОДГОРОДЕЦКИЙ Н. С. Обеспечение безопасной эксплуатации оборудования, работающего под избыточным давлением путем повышения эффективности ультразвуковых методов контроля и диагностики	88
УДОВИЧЕНКО З. В., САВИЧ Д. В. Определение поверхностных свойств вертикально стекающей пленки теплоносителя на основе водного раствора щелочи	93
ОЛЕКСЮК А. А., ШИТИКОВА И. Г. Экспериментальные исследования путей интенсификации теплообмена в трехконтурных теплообменниках змеевикового типа для независимых систем отопления и ГВС	98
ДЕРЕВЯНКО М. С. Влияние конструкции сооружений по илоотделению свободноплавающего активного ила на состав очищаемых сточных вод	106

## CONTENTS

ANTONENKO SVETLANA. Technical and Economic Assessment of Operation of Steam Boilers and Fire-Tube Heat Generators of Low Power with Electrochemical Water Treatment	5
MAKSIMOVA NATALYA, SHAYHED OLGA. The Air Conditioning System of an Apartment House with Artesian Water	12
ZIATINA VITALII. Movement Of the Fluid in the Column Clarifier with a Suspended Sediment Layer	16
MIKHAYLOV ALEXANDER. Assessment of Urban Areas and the Identification of Factors that Influence on their Transformation	22
ORLOV STANISLAV, ORLOVA ALLA. The Effect of Static Electricity on the Efficiency of the Cyclone	29
NAIMANOV AUBEKIR, TURCHINA GALINA. Reliability of the System of the Serve and Distributing of Water as the Aggregate of Structural and Exploitation Reliability	36
VYBORNOV DMITRY, MONAKH SVETLANA. Economic and Environmental Efficiency Heat Pumps, Use Heat Mine Waters	43
KOLOSOVA NELLY, MONAKH SVETLANA. Evaluation of Greenhouse Gas Emissions From Livestock Farms Waste Storage	49
CHERNYSHEV VALENTIN, TISCHENKO OLGA. Degree of Using of the Oxygen in Pneumatic Aeration System with Fabric Aerators	53
NAIMANOV AUBEKIR, TRYAKINA ALYENA. Justification of Calculated Composition of the Water for the Selection of Technological Scheme of Purification on the Basis Long-Term Observations	59
BALINCHENKO OXANA. Options of Reverse Osmose for Diminishment of Deficit of Water in Donbass	68
VYSOTSKY SERGEY, STEPANENKO TATIANA. Precipitation of Metals From Wastewater	75
VYSOTSKY SERGEY, PISARENKO ANASTASIA. Solutions of Questions of Construction in Difficult Engineering-Geological Conditions by Means of Chemical Solutions	82
PODGORODETSKY NICHOLAS. Ensuring Safe Operation of Equipment Operating Under Excessive Pressure by Increasing the Efficiency of Ultrasonic Methods for Monitoring and Diagnostics	88
UDOVICHENKO ZLATA, SAVICH DARYA. Determination of the Surface Properties of Vertically Falling Film of Coolant Based on an Aqueous Alkali Solution	93
OLEKSYUK ANATOLIY, SHYTIKOVA IRINA. Performance Evaluation of Heat Supply System Operated from Individual Heating Plants with Regenerating Accumulator Units	98
DEREVYANKO MIKHAIL. Influence of the Design of Constructions According to Separation of Free-Floating Active Silt on Composition of the Cleared Sewage	106