

Polish Academy of Sciences
University of Engineering and Economics in Rzeszów

MOTROL

COMMISSION OF MOTORIZATION AND ENERGETICS
IN AGRICULTURE

AN INTERNATIONAL JOURNAL
ON OPERATION OF FARM AND AGRI-FOOD INDUSTRY
MACHINERY

Vol. 15, No 6

LUBLIN – RZESZÓW 2013

Editor-in-Chief: Eugeniusz Krasowski
Assistant Editor: Jerzy Grudziński

Associate Editors

1. Agricultural machinery: *Valeriy Dubrovin*, Kiev, *Mariusz Szymanek*, Lublin
2. Machinery of agri-food industry: *Leszek Mościcki*, Lublin
3. Energetics: *Ilija Nikolenko*, Simferopol, *Janusz Wojdalski*, Warszawa
4. Land management, urban planning, architecture and geodesy: *Karol Noga*, Kraków, *Roman Kadaj*, Rzeszów, *Michał Proksa*, Rzeszów, *Lech Lichołaj*, Rzeszów
5. Mathematical, statistics: *Andrzej Kornacki*, Lublin, *Rostisław Bun*, Lviv

Editorial Board

Dariusz Andrejko, Lublin, Poland	Janusz Mysłowski, Szczecin, Poland
Andrzej Baliński, Kraków, Poland	Ignacy Niedziółka, Lublin, Poland
Volodymyr Bulgakow, Kiev, Ukraine	Paweł Nosko, Lugansk, Ukraine
Zbigniew Burski, Lublin, Poland	Gennadij Oborski, Odessa, Ukraine
Karol Cupiał, Częstochowa, Poland	Yurij Osenin, Lugansk, Ukraine
Aleksander Dashchenko, Odessa, Ukraine	Marian Panasiewicz, Lublin, Poland
Kazimierz Dreszer, Lublin, Poland	Sergiej Pastushenko, Mykolayiv,
Valeriy Dyadychev, Lugansk, Ukraine	Iwan Rohowski, Kiev, Ukraine
Dariusz Dziki, Lublin, Poland	Józef Sawa, Lublin, Poland
Stepan Epoyan, Kharkiv, Ukraine	Povilas A. Sirvydas, Kaunas, Lithuania
Sergiej Fedorkin, Simferopol, Ukraine	Wołodymyr Snitynskiy, Lviv, Ukraine
Jan Gliński, Lublin, Poland	Jerzy Sobczak, Kraków, Poland
Dimitriy Goncharenko, Kharkiv, Ukraine	Stanisław Sosnowski, Rzeszów, Poland
Aleksandr Holubenko, Lugansk, Ukraine	Ludvikas Spokas, Kaunas, Lithuania
L.P.B.M. Jonsen, Groningen, Holland	Jarosław Stryczek, Wrocław, Poland
Stepan Kovalyshyn, Lviv, Ukraine	Aleksander Sydorчук, Kiev, Ukraine
Józef Kowalczyk, Lublin, Poland	Wojciech Tanaś, Lublin, Poland
Elżbieta Kusińska, Lublin, Poland	Viktor Tarasenko, Simferopol, Ukraine
Andrzej Kusz, Lublin, Poland	Giorgiy F. Tayanowski, Minsk, Belarus
Janusz Laskowski, Lublin, Poland	Leonid Tishchenko, Kharkiv, Ukraine
Nikołaj Lubomirski, Simferopol, Ukraine	Henryk Tylicki, Bydgoszcz, Poland
Kazimierz Lejda, Rzeszów, Poland	Denis Viesturs, Ulbrok, Latvia
Dmytro Melnychuk, Kiev, Ukraine	Dmytro Voytiuk, Kiev, Ukraine
Jerzy Merkisz, Poznań, Poland	Anatoliy Yakovenko, Odessa, Ukraine
Ryszard Michalski, Olsztyn, Poland	Oleg Zaitsev, Simferopol, Ukraine
Aleksander Morozov, Simferopol, Ukraine	Tadeusz Złoto, Częstochowa, Poland

All the scientific articles positive evaluations by independent reviewers

Lingusitic consultant: Stepan Epoyan

Typeset: Hanna Krasowska-Kołodziej, Elena Babenko

Cover design: Hanna Krasowska-Kołodziej

Photo on the cover: Janusz Laskowski

Editorial Office address: Commission of Motorization and Energetics in Agriculture

Wielkopolska Str. 62, 20-725 Lublin, Poland

e-mail: eugeniusz.krasowski@up.lublin.pl

ISSN 1730-8658

© Copyright by Polish Academy of Sciences 2013

© Copyright by University of Engineering and Economics in Rzeszów 2013

In co-operation with Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture 2013

Edition 200 + 16 egz.

ВОДОПРОВОДНЫЕ СЕТИ Г. ХАРЬКОВА И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Дмитрий Гончаренко, Алевтина Алейникова

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры
Адрес: Украина, г. Харьков, ул. Сумская, 40
E-mail: gabriel222@rambler.ru

Аннотация. Представлены данные о техническом состоянии водопроводных сетей г. Харькова и основные пути повышения их эксплуатационной долговечности.

Ключевые слова: водопроводные сети, износ, эксплуатационная долговечность, открытый и закрытый метод восстановления.

ВВЕДЕНИЕ

С переходом Украины к рыночной экономике идет постоянное реформирование жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ), которое предусматривает техническое переоснащение этой отрасли хозяйства и ее приближение к требованиям Европейского союза относительно использования энергетических и материальных ресурсов. В этом аспекте следует выделить городскую систему водоснабжения и водораспределения г. Харькова, в которой ключевыми элементами является водопроводные сети различного диаметра. Значительная часть веток водопроводных магистралей была уложена в период массовойстройки в 60-ых и 70-ых ХХ столетия. Водопроводные сети в Харькове, из которых 65% эксплуатируются более 30 лет, имеют высокий уровень амортизации. Ежегодно протяженность технически изношенных водопроводных сетей возрастает на 1,5–2% о чем свидетельствует динамика старения инженерных сетей. В связи с этим вопрос повышения эксплуатационной долговечности трубопроводов водоснабжения стоит как никогда актуально.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Важной стороной исследуемого вопроса является то, что с реформированием водопроводно-канализационного хозяйства традиционные подходы, методы и технологии восстановления водопроводных сетей значительно снижают эффективность производимых работ, как следствие возникает острая необходимость в инновационном подходе поиска решений. В связи с этим, с позиции научных подходов относительно эффективности функционирования систем водоснабжения, следует отметить, что исследование данной проблематики осуществляется постоянно. Про это свидетельствуют работы [3-6, 14, 19-21, 12,13, 15, 22, 11].

В последние годы большое внимание вопросам восстановления трубопроводов водоснабжения уделено украинскими учеными, ведущие исследования в данной области.

Значительный анализ прогрессивного отечественного и зарубежного опыта восстановления, санации и прокладки водопроводных сетей с использованием бестраншейных технологий выполнен Д.Ф. Гончаренко[3-6], в работах которого, посвященных защите трубопроводов от коррозии и современным методам нанесения внутренних защитных покрытий, приведены характеристики материалов и оборудования для их реализации.

В.А. Петросов [14] значительное внимание уделяет коррозии и внутренней инкрустации стальных трубопроводов. Результаты многолетнего наблюдения и исследования автора позволили определить тенденцию развития этого процесса и влияние инкрустации на пропускную способность трубопровода.

Весомый вклад в разработке путей повышения эксплуатационной долговечности трубопроводов водоснабжения сделал российский ученый С.В. Храменков [19-21], в работах которого, рассмотрены и представлены множество технологий реновации трубопроводов.

Современным бестраншейным методам производства ремонтно-восстановительных работ особое внимание уделял в своих публикациях В.А. Орлов [12, 13] всячески связывая вопросы эксплуатации, реконструкции и строительства водопроводных сетей с учетом экологического фактора.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Повысить эксплуатационную долговечность трубопроводов водоснабжения можно за счет разработки организационно-технологических решений, направленных на своевременную реновацию технически изношенных участков водопроводных сетей.

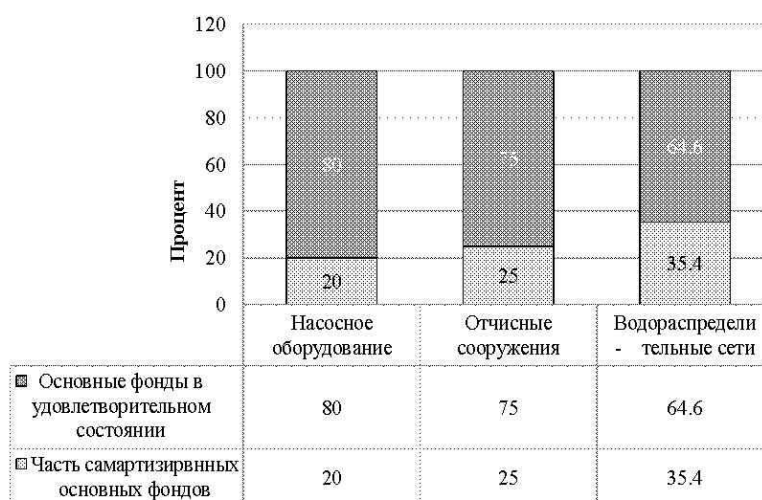


Рис. 1. Техническое состояние основных фондов предприятий водоснабжения Украины
Fig. 1. The technical condition of the fixed assets of water supply Ukraine

Целью данного исследования является обзор состояния водопроводных сетей г. Харькова и исследование основных путей повышения их эксплуатационной долговечности.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

В существующих условиях действующие предприятия систем водоснабжения городов Украины осуществляют свои социально-экономические обязательства в обществе на грани технических и организационных возможностей, про что свидетельствуют:

- износ основных фондов (техническая сторона);
- дотационность отрасли (экономическая сторона);

– устаревшая система менеджмента (организация та управление).

Изношенность основных фондов означает не только аварийные отключения, но и постоянные потери воды при передаче [14]. По официальным данным Минрегионразвития Украины, если брать все типы водоснабжения (включая нежилых потребителей), то внеплановые потери составляют 28% воды, поданной в сеть, или около 1,2 млрд м³. Иными словами, почти треть мощности системы водоснабжения расходуется вхолостую.

Харьковский водопровод эксплуатирует Коммунальное Предприятие «Харьковводоканал». Общая протяженность водоводов и водопроводных сетей КП «Харьковводоканал» составляет 2099,6 км (табл. 1) Основными материалами водопроводных трубопроводов в г. Харькове являются чугун, сталь, пластик, асбестоцемент, железобетон (рис. 2).

Таблица 1. Характеристика водопроводных сетей г. Харькова по диаметру

Table 1. Characteristics of water supply systems in Kharkov in diameter

Материал труб	Протяженность по диаметру труб (мм), км							Всего
	до 100	100-300	300-500	500-700	700-1000	1000-1500	>1500	
Сталь	22.92	170.68	93.87	114.87	47.74	104.79	0	554.9
Чугун	33.3	1018.02	383.92	40.08	26.65	0	0	1501.9
Железобетон	0	0	0	0	0.4	0.5	0	0.9
Асбестоцемент	0	1.6	0	0	0	0	0	1.6
Пластик	2.44	25.68	6.16	6.01	0	0	0	40.29
Всего	58.66	1215.98	483.95	16.96	74.79	105.29	0	2099.6



Рис. 2. Материал трубопроводов водоснабжения г. Харькова
Fig. 2. Material of Kharkov water supply pipelines

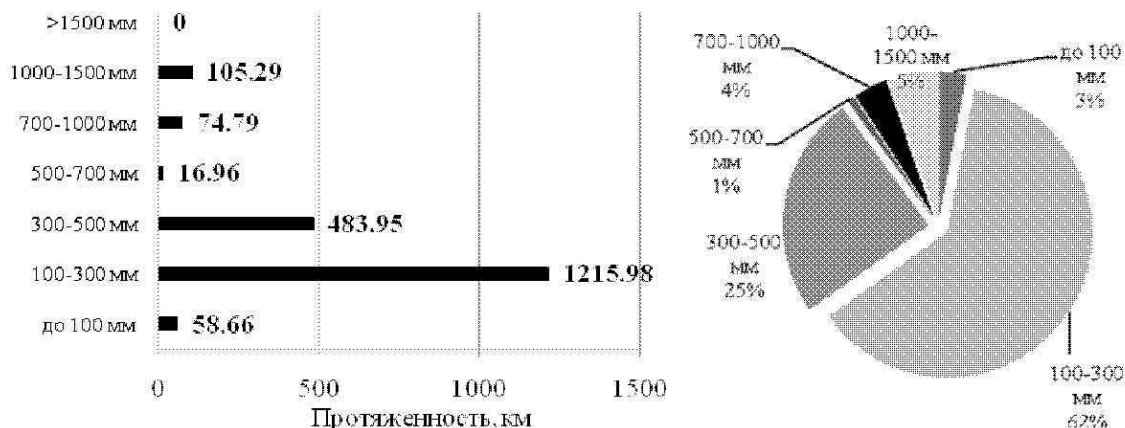


Рис. 3. Характеристика водопроводных сетей г. Харькова по диаметру
Fig. 3. Characteristics of water supply systems in Kharkov in diameter

Таблица 2. Характеристика водопроводных сетей г. Харькова по степени износа

Table 2. Characteristics of water supply systems in Kharkiv on the wear

Материал труб	Протяженность трубопроводов по степени износа, км					Всего	Подлежит замене
	< 25%	25-50 %	50-75 %	75-90 %	> 90 %		
Сталь	4.5	29.3	136.1	161.36	223.7	554.9	223.7
Чугун	26.6	139.1	364.8	449.56	521.9	1501.9	521.9
Железобетон	-	-	-	-	-	0.9	-
Асбестоцемент	-	-	-	-	-	1.6	-
Пластик	40.28	-	-	-	-	40.28	-
Всего	71.38	168.4	500.9	610.92	745.6	2099.58	745.6

Следует отметить, что стальные и чугунные трубопроводы составляют около 95 % от общей протяженности сетей водоснабжения, стальные трубопроводы – 26,4% от общей протяженности.

Причины низкой надежности трубопроводов городов Украины [5] неоднократно упоминались в исследованиях данной проблематики, а именно:

- износ трубопроводов;
- неправильный выбор материала труб и класса их прочности, отвечающего фактическим внешним и внутренним нагрузкам, воздействующим на трубопровод;

– несоблюдение технологии производства работ по укладке и монтажу трубопроводов;

– отсутствие необходимых мер по защите трубопроводов от агрессивного воздействия внешней и внутренней среды;

– разрушающие давления, воздействие гидравлических ударов, падение долговременной прочности; несоответствие качества труб требованиям ГОСТов и т.п.

Степень износа трубопроводов водоснабжения г. Харькова представлена на рисунке 4.

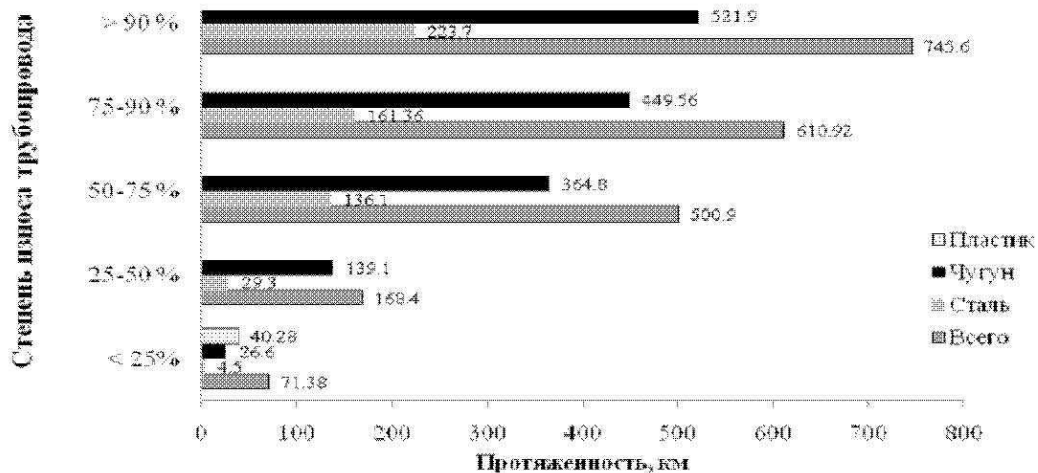


Рис. 4. Степень износа водопроводных сетей г. Харькова
 Fig. 4. The degree of deterioration of water supply systems in Kharkov

Чугунные трубы отличаются повышенными характеристиками прочности, надежности, устойчивости к сильным резким перепадам температур. Такие трубы обладают наибольшим сроком эксплуатации, который во многих случаях может достигать 80 лет. Немаловажным преимуществом чугунных труб является то, что они способны успешно противостоять коррозии. Преимущества и недостатки чугунных труб определяются сферой их использования. Одним из существенных недостатков является сложность монтажа таких труб. Соединения чугунных труб производят или зачеканкой стыков каболой, которая пропитывается раствором расширяющегося цемента, или же заливкой их расплавленной серой. Оба способа являются достаточно трудоемкими, а с учетом немалого веса труб и использования расплавленных материалов при работе – еще и небезопасными. В то же время работа с трубами из поливинилхлорида занимает минимум времени и сил, в связи с чем чугунные трубы постепенно утрачивают свою актуальность.

По оценкам специалистов, в Украине примерно 70% подземных трубопроводов собрано

из стальных труб [14]. В системах холодного водоснабжения и отопления показатель достигает 95%. Главные характеристики стальных труб:

- срок службы – 10 лет;
- низкая цена;
- невысокая стойкость к коррозии;
- способ соединения: сварка, резьбовые соединения;
- при повышении температуры слабо деформируются;
- возможен разрыв при резком повышении давления.

Самый большой недостаток стальных труб – это сильная подверженность коррозии (характер коррозии - рис.5, рис.6) что обусловливается прямым контактом ничем не покрытой стали и воды. Коррозия является причиной ржавой воды, зарастания внутреннего диаметра трубы, способствует снижению пропускной способности [3]. В большинстве случаев данная проблема появляется уже на протяжении первых 6-7 лет эксплуатации, несмотря на то, что все производители гарантируют более длительный срок.



Рис. 5. Пальпация макрошероховатости с анаэробными бактериями
 Fig. 5. Palpation macroroughness with anaerobic bacteria

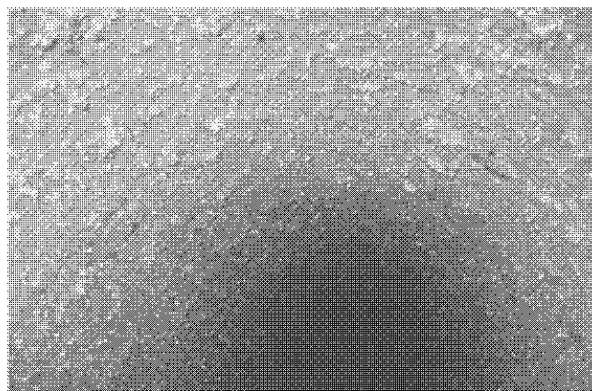


Рис.6. Инкрустация на внутренней поверхности водовода диаметром 1400 мм (время эксплуатации водовода 34 лет).

Fig. 6. Inlay on the inner surface of the conduit diameter of 1400 mm (water pipe during operation 34 years).

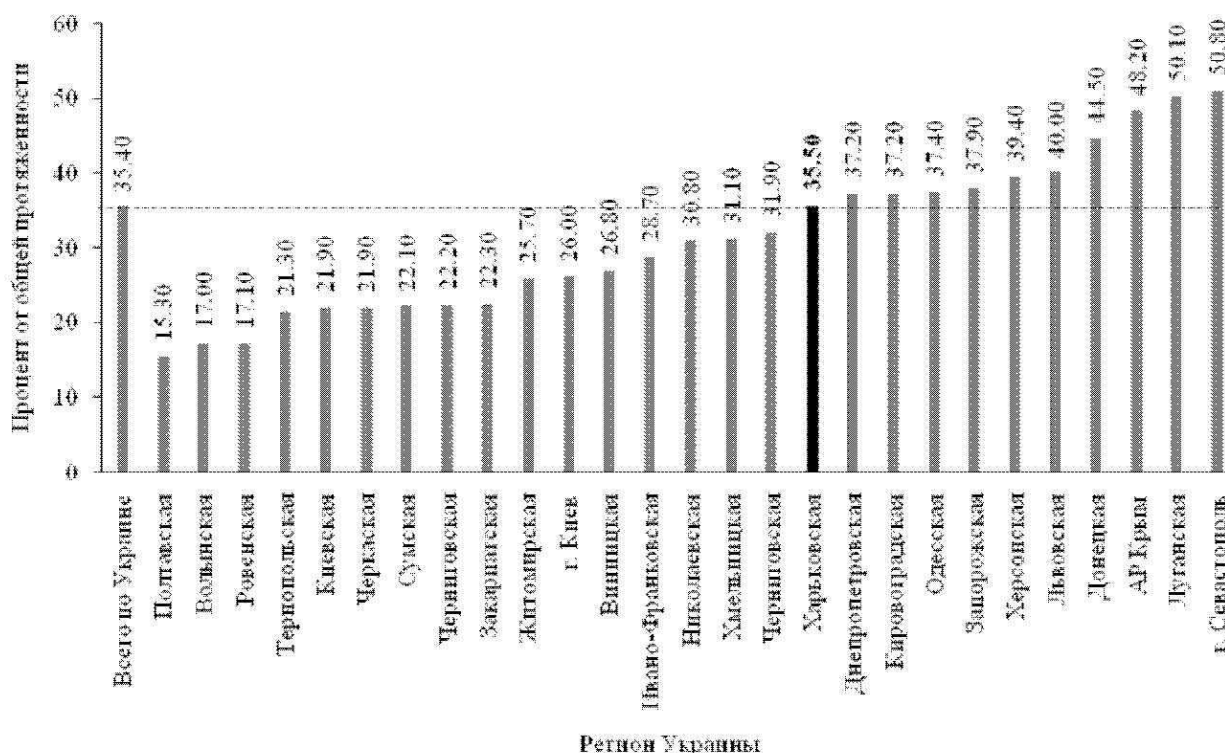


Рис. 7. Доля сетей водоснабжения в Украине, находящихся в аварийном состоянии

Fig. 7. The share of water supply in Ukraine that are in poor condition

Из общей протяженности 745, 6 км водопроводных сетей г. Харькова – технически изношены и подлежат санации и перекладке (около 35,5 % от общей протяженности). Данный показатель является одним из самых высоких в Украине (рис.7). В конце 90-х годов минувшего столетия среднее число аварийных повреждений трубопроводов на единицу их длины в Украине примерно вдвое превышало этот показатель в странах западной и центральной Европы, удельное количество аварий за последнее десятилетие возросло примерно в пять раз. На сегодняшний день этот показатель составляет – 2,15 шт/км.

В настоящее время все большее внимание уделяется разработке эффективных организационно-технологических мероприятий, направленных на ремонт водопроводных сетей, обзор состояния сетей водоснабжения г. Харькова тому наглядный пример. При ремонте труб возможны два основных способа производства работ - открытый и закрытый.

Традиционные методы ремонта трубопроводов до недавнего времени, независимо от их назначения, проводились так называемым «открытым» способом. Этот способ предусматривает вскрытие грунтов (рытье траншей)

на заданную глубину, проведение технических мероприятий по подготовке траншеи для прокладки трубопровода (как правило, это выравнивание дна траншеи), создание песчаной постели, прокладка трубопровода или кабеля, засыпка проложенных коммуникаций инертным материалом, окончательная засыпка траншеи и, наконец, восстановление растительного слоя или дорожного полотна. Существуют следующие особенности:

- При проведении работ в городе необходимо обеспечить безопасные условия их проведения на достаточно длительный период, что влечет за собой согласование с различными дорожными службами.

- При работе в зоне железных дорог приходится проводить различные специальные мероприятия по укреплению железнодорожного полотна, ограничивать скорость движения составов.

- При прохождении коммуникаций через водоемы требуется применение специального водозащитного оборудования, специальной техники для рытья траншей по дну, специальных мероприятий по прокладке дюкера и специального же контроля его состояния в процессе дальнейшей эксплуатации.

Нельзя забывать про затраты на временные сооружения, необходимые во время проведения работ. Не поддается экономическому анализу ущерб, который наносится окружающей среде при проведении работ по прокладке и ремонту коммуникаций открытым способом. Необходимо отметить, что в Европе постоянно растет число

объектов, где находят применение методы бестраншейной технологии ремонта, реконструкции и прокладки коммуникаций. Этот рост носит более стремительный характер, чем в США, поскольку крупнейшие европейские города были заложены, в основном, несколько столетий назад.

Бестраншейные технологии характеризуются высоким уровнем механизации, почти стационарным режимом работы и, в отличие от траншейного способа, меньшим объемом ручных работ [19]. Контакт с поверхностью грунта и асфальтобетонным покрытием либо полностью исключен (при работе по методу «из колодца в колодец»), либо происходит только на начальном и конечном этапах работ. Кроме того, бестраншейная технология позволяет отказаться от транспортных операций. Другими преимуществами являются легкость пересечения уже существующих коммуникаций и возможность отказа от водоотливных мероприятий. Одним из решений является прокладка труб методом прокола.

В настоящее время общепризнанными являются шесть технологий (или способов) бестраншейного ремонта инженерных сетей, каждый из которых имеет ряд методов для решения какой-либо задачи по ремонту конкретного объекта инженерии (таблица 2). Все они основаны на использовании труб, изготовленных из полимерных материалов: полиэтилена, полипропилена, их композитов и др [20].

Таблица 3. Бестраншейные способы ремонта трубопроводов

Table 3. Trenchless pipe repair methods

№ п/п	Способ	Описание
1	«труба в трубе»	технология протаскивания во внутреннюю полость ремонтируемого участка (после гидродинамической очистки) новой (предварительно сваренной) плети полиэтиленовых труб с максимально близким по диаметру размером
2	«взламывание»	технология принудительной протяжки полиэтиленовой плети труб с помощью пневматических или гидравлических механизмов, предварительно разрушающих старую трубу
3	«чулок»	технология протаскивания во внутреннюю полость ремонтируемого участка сети (после гидродинамической очистки) специального синтетического чулка с его последующим технологическим восстановлением по внутреннему периметру ремонтируемого трубопровода
4	«цементно-песчаной облицовки»	технология центробежного нанесения на внутреннюю, предварительно очищенную, поверхность труб цементно-песчаного слоя фиксированной величины (рис. 7)
5	«лайнер»	технология протаскивания во внутреннюю полость ремонтируемого участка сети (после гидродинамической очистки) специальной пластмассовой плети труб U-образной формы с их последующим технологическим восстановлением по внутреннему периметру ремонтируемого трубопровода
6	«локальный ремонт»	технология локального устранения отдельных дефектов труб (после предварительной TV-оценки с применением специализированных телевизионных камер) с помощью специальных самоходных роботов

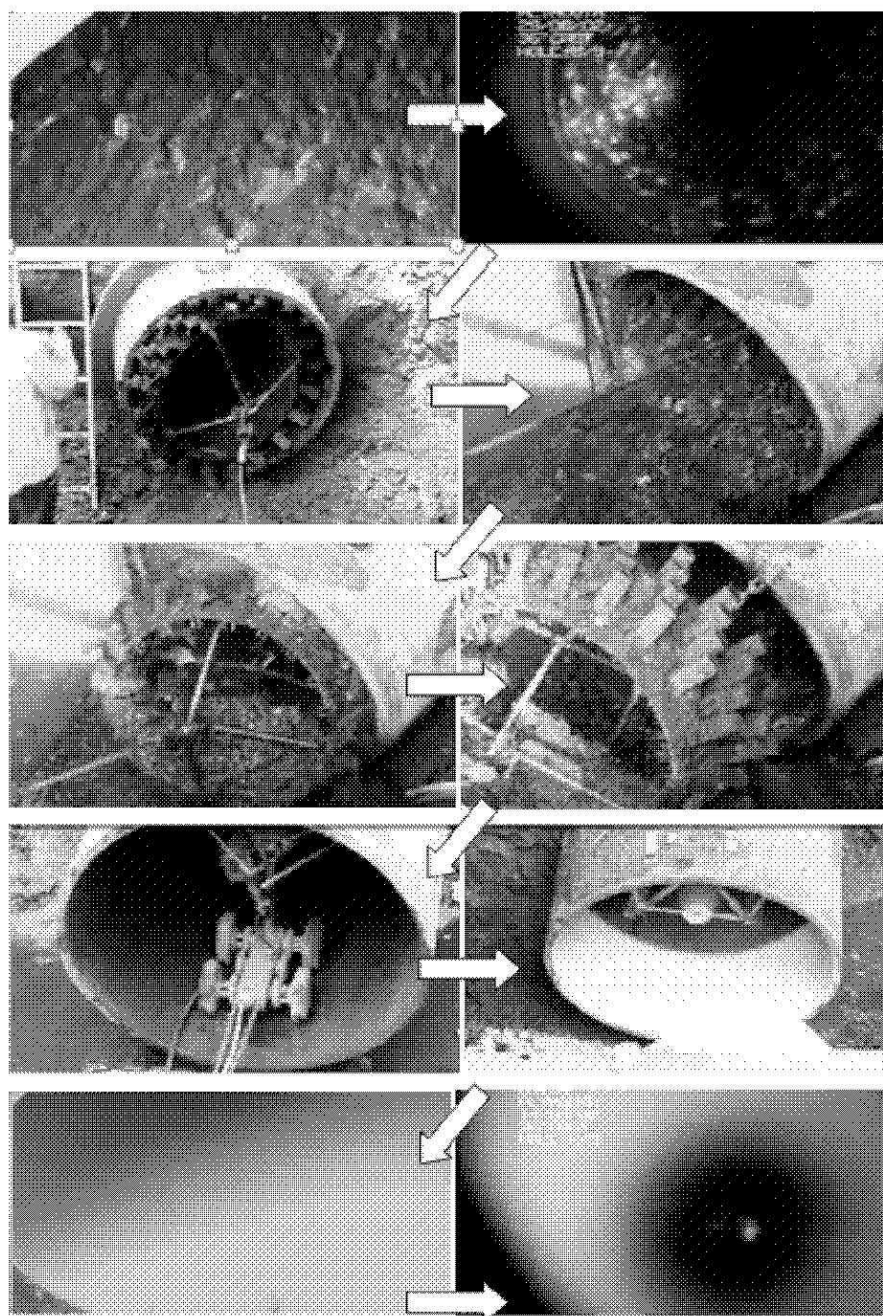


Рис. 8. Технология производства работ бестраншейным способом «цементно-песчаной облицовки» водовода «Кочеток-Харьков»

Fig. 8. Technology of production of works trenchless method «of cement-sand wall» water line «Kochetok-Kharkov»

В Украине из-за отсутствия соответствующего оборудования и материалов ремонт и прокладка коммуникаций в последние годы производились преимущественно открытым способом, что приводило к резкому увеличению стоимости работ и сроков строительства объектов, а также к необходимости разрушения дорожных покрытий и перекрытию движения автомобильного и железнодорожного транспорта. Следовательно, исследование относительно эффективности применения бестраншейных технологий является

актуальным в условиях ограниченных финансовых ресурсов.

ВЫВОДЫ

Состояние водопроводных сетей г. Харькова находится в состоянии высокого технического износа. Таким образом, как открытый, так и закрытый способы ремонта и восстановления водопроводных сетей позволяют значительно

повысить ресурс их безаварийной эксплуатации. Бестраншейные технологии позволяют:

- резко повысить темпы работ по новому строительству и ремонту изношенных коммуникаций;
- соблюдать экологические нормы, практически исключить ведение земляных работ;
- обеспечивать бесперебойное движение транспорта в районе проведения работ;
- снизить затраты на 30-35% по сравнению с открытым способом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агапчев В.И., Виноградов В.А., Мартешова В.А., Пермяков Н.Г. 2003 Состояние и перспективы бестраншейного метода восстановления систем водоснабжения и водоотведения // Водоснабжение и санитарная техника (ВСТ). – Вып. 12. 17–19.
2. Гончаренко Д.Ф., Вевеллер Х. 2008 Состояние трубопроводов водоснабжения и основные технологии их ремонта // Наук. вісн. будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – Вып. 49. – 37–42.
3. Гончаренко Д.Ф., Вевеллер Х., Паболков В.В. 2010 О необходимости учета прочностных свойств полиэтиленовых труб в технологическом процессе ремонта сетей водоснабжения // Зб. наук. праць ПДАБА. – Днепропетровск: ПГАСА. – Вып. 52. – 113–119.
4. Гончаренко Д.Ф., Старкова О.В., Вевеллер Х., Алейникова А.И. 2010 К вопросу о состоянии сетей водоснабжения Харькова // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. – К.: Техника. – Вып. 98. – 55–59.
5. Гончаренко Д.Ф., Яровой Ю.Н., Вевеллер Х. 2010 Снижение линейной деформации полиэтиленовых труб водопроводных магистралей // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. – К.: Техника. – Вып. 98. – 51–55.
6. ДБН 360–92 1992 «Планування і забудова міських і сільських поселень». – К.: Мінінвестбуд України. – 95.
7. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений: Справочник в 2-х томах / Под ред. А.А. Герасименко. – М.: Машиностроение, 1987. – Т.1. – 688.
8. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений: Справочник в 2-х томах / Под ред. А.А. Герасименко. – М.: Машиностроение, 1987. – Т.2. – 784.
9. Колотило М.І. та ін. 2004 Труби, фасонні деталі, арматура та обладнання систем зовнішнього водопостачання і каналізації: Довідковий посібник. – Харків: Митець, – 253.
10. Махнев П.П., Юдин М.Ю. и др. 2003 Разработка программы реконструкции водопроводных сетей на основе моделирования процесса подачи и распределения воды // Водоснабжение и санитарная техника (ВСТ). – Вып. 10. – 2–5.
11. Орлов В.А. 1997 Эксплуатация, реконструкция и строительство водопроводных и водоотводящих сетей с учетом экологического фактора // Строительство и архитектура. – Вып. 2. – 33.
12. Орлов В.А., Харькин В.А. 2001 Стратегия и методы восстановления подземных трубопроводов. – М.: Стройиздат. – 94.
13. Петросов В.А. 2007 Устойчивость водоснабжения. – Харьков: Издательский дом «Фактор». – 357.
14. Примин О.Г. 2006 Оценка и прогноз технического состояния трубопроводов // Водоснабжение и санитарная техника (ВСТ). – Вып. 1, ч. 1. – 25–28.
15. Салиев Э., 2009. Эколого-экономические проблемы внедрения энергосберегающих технологий в Украине. MOTROL. — Commission of motorization and energetics in agriculture : Polish Academy of sciences. — Lublin. — Vol. 11B. — 104—111.
16. СНиП 2.04.02–84 1985 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения». – М.: Стройиздат. – 133.
17. Старкова О.В., Вевеллер Х., Паболкова Е.В., Алейникова А.А. 2010 Состояние сетей водоснабжения Харькова и основные технологии их ремонта и восстановления // Наук. вісн. будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – Вып. 58. – 329–334.
18. Храменков С.В. и др. 1998 Современные бестраншейные методы ремонта трубопроводов // Водоснабжение и санитарная техника (ВСТ). – Вып. 3. – 6–9.
19. Храменков С.В. 2003 Принципы обеспечения надежности водопроводной сети в условиях сокращения водопотребления // Водоснабжение и санитарная техника (ВСТ). – Вып. 5, ч. 2. – 27–31.
20. Храменков С.В., Примин О.Г. 1998 Оценка надежности трубопроводов системы водоснабжения Москвы // Водоснабжение и санитарная техника (ВСТ). – Вып. 7. – 6–9.

WATER SUPPLIES IN KHARKIV AND WAYS TO IMPROVE THEIR OPERATIONAL LIFE

Summary. The data on the technical condition of the water supply systems of Kharkov and the basic ways to increase their useful life.

Key words: water mains, depreciation, operational durability, indoor and recovery method

ВЫБОР ФИЛЬТРУЮЩЕЙ ЗАГРУЗКИ ДЛЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ФИЛЬТРОВ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ НАПРАВЛЕНИЕМ ФИЛЬТРАЦИИ

Степан Эпоян, Андрей Карагяур, Владимир Паболков

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

Адрес: Украина, г. Харьков, ул. Сумская, 40

E-mail: ykg.knuca@ukr.net

Аннотация. Представлены результаты теоретических исследований влияния параметров фильтрующей загрузки на эффективность работы многослойного фильтра с горизонтальным направлением фильтрации.

Ключевые слова: фильтрация, диаметр зерен, пористость, фильтрующая загрузка, многослойный фильтр

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение населения качественной питьевой водой для Украины является приоритетной задачей. Для многих регионов проблема усугубляется дефицитом водных ресурсов. Кроме того, по причине изменения климата и сброса недостаточно очищенных сточных вод различных категорий ухудшается качество воды в водоемах. Большинство существующих очистных сооружений для подготовки питьевой воды из поверхностных источников включают такую важную стадию как фильтрование. В последнее время бурно развиваются и широко внедряются мембранные методы удаления коллоидных и взвешенных веществ. Но установки мембранной микро- и ультрафильтрации работают по принципу процеживания, из-за чего имеют небольшую грязеемкость и требуют частых промывок даже при небольших концентрациях взвеси в исходной воде [1]. Поэтому для станций очистки большой и средней производительности перспективным направлением решения проблемы качественной подготовки воды является интенсификация работы фильтровальных сооружений с зернистой загрузкой, которые являются наиболее сложным элементом всей системы.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Наиболее распространенными фильтровальными сооружениями на станциях водоподготовки с двухступенчатой очисткой являются скорые фильтры с однослойной и двуслойной загрузкой. Основным недостатком однослойных фильтров является накопление загрязнений в верхнем слое фильтрующей загрузки, и быстрый рост по этой причине потерь напора. Фильтр необходимо отключать на промывку, при этом грязеемкость нижних слоев загрузки остается неисчерпанной. Решить данную проблему позволяет применение двухпоточных или многослойных фильтров [5, 8, 9, 20, 22]. Но в двухпоточных фильтрах дренажная система для отвода фильтра

расположена непосредственно в фильтрующей загрузке, что увеличивает вероятность ее кольматации и попадания частиц загрузки в очищенную воду. Кроме того, конструкция таких сооружений и управление их работой значительно сложнее в сравнении с однопоточными фильтрами [8].

Также эффективным решением, но усложняющим технологическую схему очистки, является применение многоступенчатых фильтров с попеременным чередованием каждой ступени [18, 21].

Проблема многослойных фильтров состоит в том, что при промывке фильтрующая загрузка перемешивается и через некоторое время становится однородной. Данное явление наблюдается на многих очистных сооружениях городов Украины, в том числе города Харькова. Это происходит потому, что фильтрация и промывка протекают в параллельных направлениях.

Избежать перемешивания слоев можно, если направления фильтрации и промывки сделать перпендикулярными.

Известны конструкции фильтров, где вода последовательно фильтруется в горизонтальном направлении, а промывка осуществляется в вертикальном направлении. В этих сооружениях слои фильтрующей загрузки разделены пористыми или перфорированными перегородками, что препятствует их перемешиванию при промывке [2, 3].

Анализ конструкции подобных фильтров и выявил их основные недостатки [25]:

- Сбор промывной воды в данных устройствах предусмотрен в той части фильтра, которая непосредственно граничит с одной из перфорированных перегородок. При промывке основной поток воды будет двигаться не через фильтрующую загрузку, а в направлении меньшего сопротивления, т.е. через перегородку непосредственно переходить в камеру сбора промывной воды.
- При промывке невозможно обеспечить движение воды в вертикальном направлении, соответственно, необходимую для каждого слоя

интенсивность промывки. Промывная вода будет двигаться не только в вертикальном направлении, но и по пути наименьшего сопротивления через перфорированные перегородки в сторону загрузки с большей крупностью зерен. Это приводит к неудовлетворительному качеству регенерации фильтра и повышенным расходам промывной воды.

- В представленных фильтрах происходит одновременная промывка всех слоев: тех, где уровень загрязнений достиг предела, и тех, грязеемкость которых еще не исчерпана. Это также приводит также к повышенным эксплуатационным расходам.
- Так как большинство представленных фильтров радиальные, то скорость фильтрования в каждом из слоев не будет одинаковой. Это может привести к ухудшению качества фильтрования в слое, близком к центру в результате отрыва частиц взвеси от зерен загрузки вследствие повышенной скорости фильтрования.

Таким образом, конструкции фильтров с перпендикулярными направлениями фильтрации и промывки требуют усовершенствования.

Теоретически обосновать рациональные конструктивные и технологические параметры данных сооружений возможно с помощью математического моделирования.

Большинство существующих моделей работы скорых фильтров базируются на уравнениях, предложенных Д.М. Минцем [10], представляющих собой балансовое уравнение и уравнение кинетики. Скорость фильтрования в данных моделях зачастую принимается величиной постоянной [4, 14]. Влияние кольматации на рост потерь напора или не учитывается [14], или для определения потерь напора по толщине фильтрующей загрузки привлекаются дополнительные эмпирические зависимости, область применения которых ограничена. Данные модели могут усложняться: в [6] получены решения для фильтрации с убывающей скоростью, в [11] - для переменной концентрации взвешенных веществ в очищаемой воде, [14] - для двухслойного фильтра.

В ряде работ для моделирования непосредственно используются уравнения кинетики сорбции взвеси на зернах загрузки, переноса взвеси потоком фильтрующейся жидкости и уравнение фильтрации. Влияние кольматации учитывается привлечением эмпирической зависимости между коэффициентом фильтрации и количеством задержанной взвеси. Несмотря на сложность данных моделей, получены строгие решения при линейной и нелинейной кинетике [17], а также для нелинейного закона фильтрации [16, 19].

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Кроме усовершенствования фильтров с перпендикулярными направлениями фильтрации и промывки важной задачей является выбор фильтрующей загрузки. Ее параметры влияют как на кинетику осаждения взвеси, так и на динамику потока.

Таким образом, целью исследований является разработка методики оценки влияния параметров фильтрующей загрузки на эффективность работы фильтра с горизонтальным направлением фильтрации.

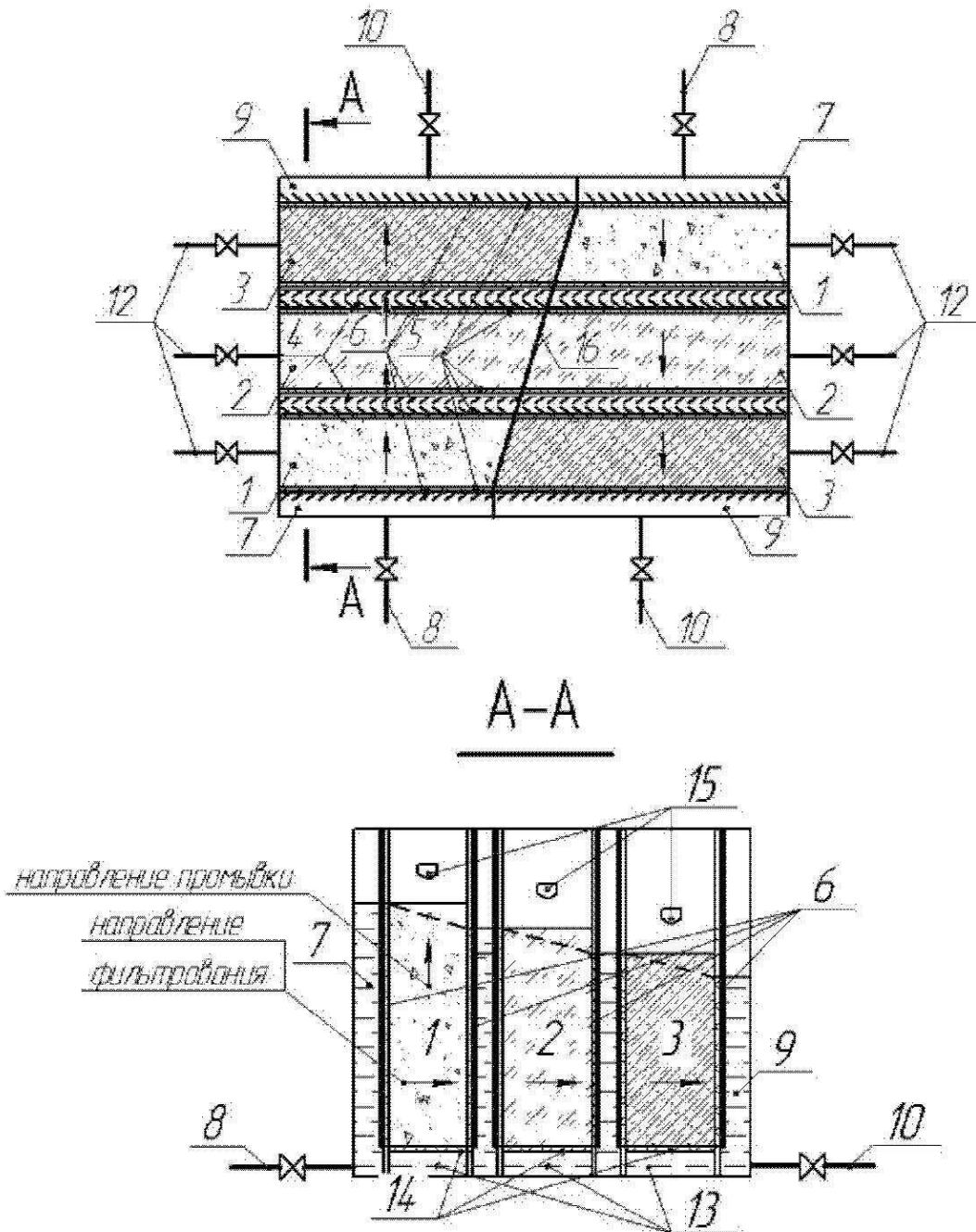
Для этого необходимо расширить систему основных уравнений, описывающих процесс фильтрации и кольматации в фильтре усовершенствованной конструкции, путем добавления зависимости, связывающей коэффициент фильтрации с параметрами фильтрующей загрузки, а также проанализировать влияние диаметра зерен загрузки каждого слоя на эффективность очистки.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

С учетом анализа существующих решений нами предложен фильтр с усовершенствованной конструкции (рисунок 1) [15].

Данный фильтр состоит из двух секций трапециевидной формы. Каждая из секций включает три камеры, рабочая часть которых заполнена фильтрующей загрузкой с уменьшающейся по направлению фильтрования крупностью зерен. Камеры разделены каналами из пористых перегородок, выполненных, например, из полимербетона. В каналах предусмотрены затворы, которые в режиме фильтрования открыты и свободно пропускают воду, а в режиме промывки закрыты. Это препятствует перетеканию промывной воды из одной камеры в другую. Благодаря этому промывке подвергаются только те камеры, грязеемкость загрузки которых исчерпана, что обеспечивает необходимую интенсивность промывки и уменьшает объемы промывной воды [13].

Промывная вода подается в нижнюю часть камер, которая отделена от рабочей части пористыми плитами. Над фильтрующей загрузкой с учетом ее расширения расположены желоба для отвода промывной воды.



1, 2, 3 – камеры с разной фильтрующей загрузкой; 4, 7, 9 – каналы; 5 – пористая перегородка; 6 – затворы; 8 – трубопровод исходной воды; 10 – трубопровод отвода фильтрата; 11 – трубопровод отвода промывной воды; 12 – трубопровод подачи промывной воды; 13 – нижняя часть камер; 14 – пористая плита; 15 – желоб; 16 – сплошная перегородка

Рис. 1 Скорый многослойный фильтр усовершенствованной конструкции

1, 2, 3 - filter chambers with varying filter loading, 4, 7, 9 - canals; 5 - porous wall, 6 - valves, 8 - pipeline of initial water, 10 - the filtrate discharge pipeline; 11 - outlet pipeline of washing water, 12 - pipeline supplying washing water, 13 - the lower part of the chamber, 14 - porous plate, 15 - canal, 16 - a solid wall

Fig. 1. Fast multilayer filter improved construction

Высота фильтрующей загрузки в каждой последующей по направлению фильтрации камеры имеет меньшее значение приблизительно на величину потерь напора. За счет роста потерь напора уменьшается уровень воды и площадь поперечного сечения. Чтобы сгладить в этом случае рост скорости фильтрации в каждой камере, секции фильтра разделены непроницаемой перегородкой, которая придает им трапециевидную форму. Эта перегородка обеспечивает увеличение ширины каждой последующей камеры, что замедляет рост скорости фильтрующегося потока, соответственно, замедляет перенос примеси и уменьшает вероятность отрыва задержанных частиц взвеси от фильтрующей загрузки [23].

Для описания процесса работы скорого фильтра предложенной конструкции для условий постоянства во времени расхода воды $Q = \text{const}$ выбрана следующая система уравнений [24]:

- уравнение фильтрации:

$$Q = V(x) \cdot h(x, t) \cdot k(x, t) \cdot \frac{\partial h(x, t)}{\partial x};$$

$$v(x, t) = -k(x, t) \frac{\partial h(x, t)}{\partial x} \quad (1)$$

- уравнение переноса взвешенных частиц потоком фильтрующейся жидкости:

$$(n_0 - S(x, t)) \frac{\partial C(x, t)}{\partial t} + v(x, t) \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} + \frac{\partial S(x, t)}{\partial t} = 0; \quad (2)$$

- уравнение массопередачи между жидкой и твердой фазами:

$$\frac{\partial S(x, t)}{\partial t} = b \cdot C(x, t) - a \cdot S(x, t); \quad (3)$$

где Q - производительность фильтра; $h(x, t)$ - напор (уровень воды) в фильтрующей загрузке; $v(x, t)$ - скорость фильтрации; $k(x, t)$ - коэффициент фильтрации; x - координата вдоль направления фильтрации, t - время; $V(x)$ - ширина фильтра (изменение обусловлено трапециевидностью секции); n_0 - начальная пористость фильтрующей загрузки; $C(x, t)$ - концентрация взвешенных веществ в фильтрующейся жидкости; $S(x, t)$ - концентрация задержанных взвешенных веществ в фильтрующей загрузке; a и b - коэффициенты, соответственно, отрыва и прилипания частиц взвеси к зернам загрузки.

Коэффициенты a и b определяются по зависимостям:

$$a = \frac{\alpha}{d_s}; \quad b = \frac{\beta}{(V(x, t) \cdot d_s)^{0,7}} \quad (4)$$

где α и β - коэффициенты, учитывающие физико-химические свойства загрузки и очищаемой суспензии; d_s - эквивалентный диаметр зерен загрузки.

Дополнительно использована зависимость коэффициента фильтрации от степени закольматированности частицами взвеси фильтрового пространства [12]:

$$k(x, t) = k_0 \left(1 - \frac{S(x, t)}{n_0} \right)^3, \quad (5)$$

где k_0 - коэффициент фильтрации загрузки вначале фильтроцикла (незакольматированной).

Система уравнений (1) - (5) решается при следующих граничных и начальных условиях:

- начальные условия:

$$t = 0; \quad k = k_0; \quad h(x) = \sqrt{h_0^2 - \frac{2 \cdot Q \cdot L}{k_0 \cdot B(x)}}; \quad C = 0; \quad S = 0;$$

- граничные условия:

$x = 0; \quad h = h_0; \quad C = C_0; \quad S$ находится из уравнения (3),

где L - толщина слоя фильтрующей загрузки.

Для многослойного фильтра концентрация взвеси в воде и напор на выходе из предшествующего фильтрующего слоя является граничным условием для последующего слоя.

Для анализа влияния таких параметров фильтрующей загрузки как диаметр зерен и пористость на коэффициент фильтрации можно воспользоваться формулой Слихтера [7]:

$$k_0 = A \cdot \left(\frac{n_0}{1 - n_0} \right) \cdot d_s^2 \cdot T_t, \quad (6)$$

где A - условный параметр, T_t - температурный коэффициент.

Следует отметить, что анализ различных расчетных зависимостей для определения коэффициента фильтрации, выполненный в [7], показал, что значения, получаемые с помощью формулы Слихтера, лежат в середине диапазона значений, получаемых с помощью других зависимостей.

Система уравнений (1) - (6) для каждого слоя решается численно конечно-разностным методом. На рисунке 2 представлен пример расчета концентрации взвеси в очищенной воде (C_2), выраженной в процентах от содержания взвеси в исходной воде, при различных эквивалентных диаметрах зерен фильтрующей загрузки первого (d_1) и второго (d_2) слоев.

На рисунке 2 виден минимальный экстремум параметра C_2 . Это можно объяснить следующим образом. Согласно зависимостям (4) вероятность прилипания частицы взвеси к зерну фильтрующей загрузки увеличивается с уменьшением диаметра зерна: зерна меньшего диаметра имеют большую удельную поверхность, что способствует лучшему массообмену. На процесс отрыва частицы диаметр

зерна имеет почти такое же влияние, но в диапазоне скоростей потока при фильтрации преобладает процесс прилипания, поэтому влияние процесса отрыва частиц не так существенно. С другой стороны, чем меньше диаметр зерен загрузки, тем меньше коэффициент фильтрации и больше потери напора (рисунок 3). При этом уровень воды в фильтрующей загрузке падает резко, уменьшая площадь поперечного сечения. При постоянном расходе это обуславливает увеличение скорости фильтрации, соответственно, более быстрый перенос взвеси и ее накопление на зернах загрузки, что еще более усиливает потери напора и приводит к ухудшению качества фильтрата.

На рисунке 4 представлен пример расчета концентрации взвеси в очищенной воде (C_2), выраженной в долях от содержания взвеси в

исходной воде, при различных значениях пористости фильтрующей загрузки первого (n_{01}) и второго (n_{02}) слоев.

Как видно из рисунка 4, наибольшее влияние на качество очистки оказывает пористость первого слоя. Это можно объяснить следующим. При уменьшении пористости первого слоя фильтрующей загрузки с одной стороны уменьшается коэффициент фильтрации, соответственно, падает уровень воды, возрастает скорость потока, в том числе, и во втором слое. Перенос взвеси происходит быстрее. С другой стороны, уменьшение пористости согласно зависимости (5) приводит к более быстрому насыщению фильтрующей загрузки взвешенными веществами, что также обуславливает более резкое увеличение потерь напора (рисунок 5).

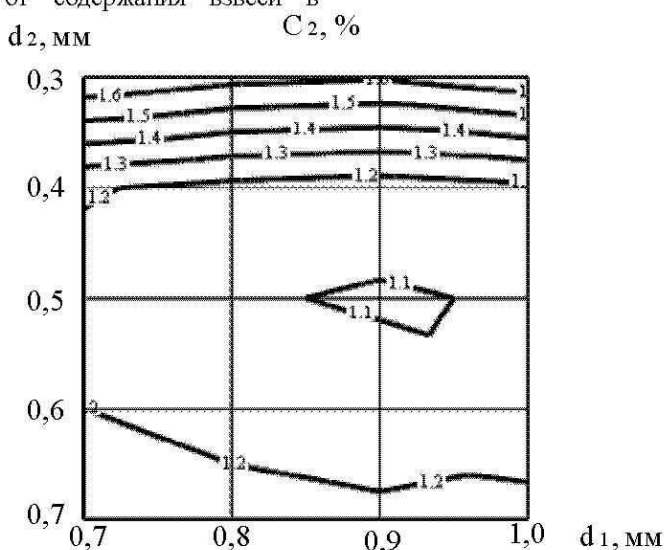


Рис. 2. Зависимость качества очистки от диаметра зерен фильтрующей загрузки

Fig. 2. The dependence of the purification quality on the diameter of the grain filter loading

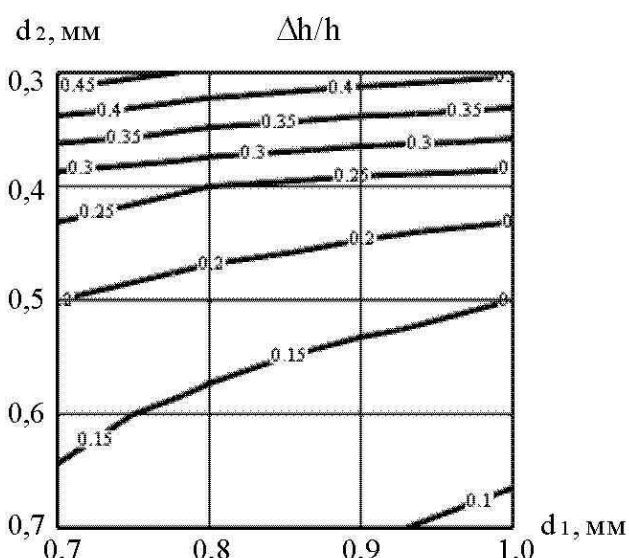


Рис. 3. Зависимость потерь напора от диаметра зерен фильтрующей загрузки

Fig. 3. The dependence of the head loss on the diameter of the grain filter loading

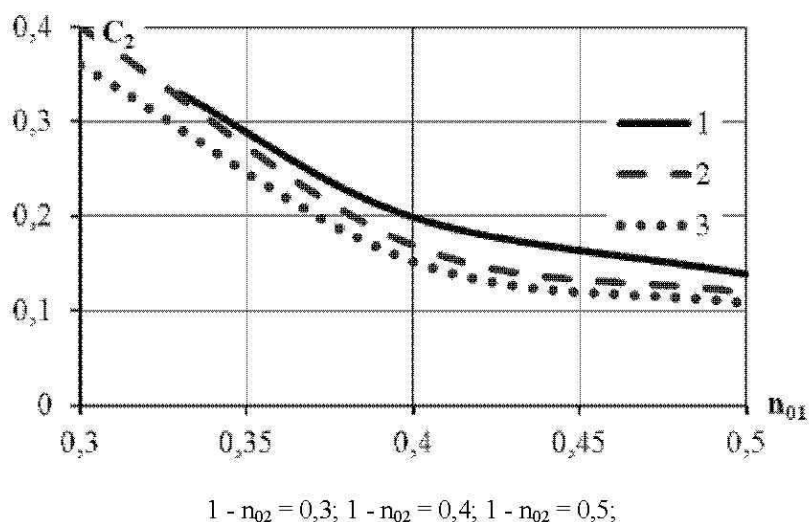


Рис. 4. Зависимость качества очистки от пористости фильтрующей загрузки

Fig. 4. The dependence of the purification quality on the porosity filter loading

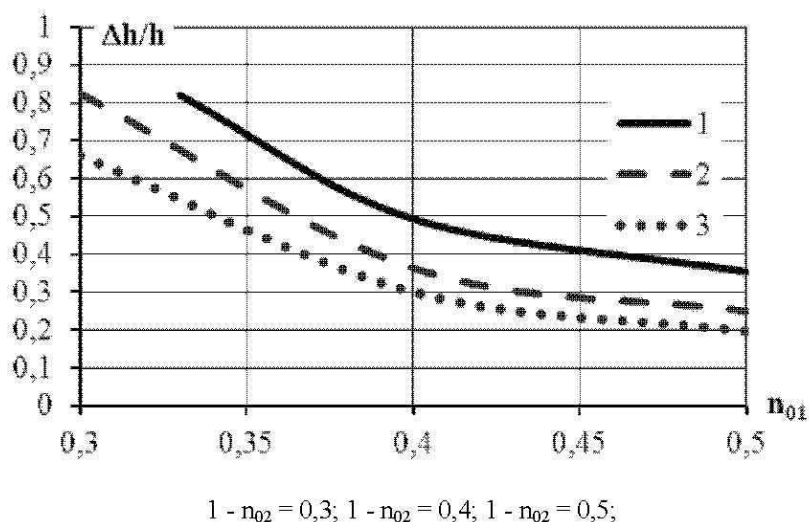


Рис. 5. Зависимость потерь напора от пористости фильтрующей загрузки

Fig. 5. The dependence of the head loss on the porosity filter loading

Следовательно, при использовании многослойных фильтров необходимо стремиться к применению для первых по направлению фильтрации слоев фильтрующих материалов не только с большим эквивалентным диаметром зерен загрузки, но и с большей пористостью.

Таким образом, представленная методика позволяет для многослойного фильтра усовершенствованной конструкции с заданными конструктивными и технологическими характеристиками подобрать фильтрующую

загрузку, обеспечивающую наибольшую эффективность очистки.

ВЫВОДЫ

Представлена конструкция усовершенствованного многослойного фильтра, позволяющая исключить перемешивание зерен фильтрующей загрузки при промывке, и предоставляющая возможность отдельной промывки каждого слоя. Также представлена математическая модель работы данного

сооружения, с помощью которой проведен анализ влияния таких параметров фильтрующей загрузки как эквивалентный диаметр зерен загрузки и пористость на эффективность очистки.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. Eroyan, A. Karagiaur, S. Babenko. 2012 Researching the work of membrane ultrafiltration module / MOTROL // Motoryzacja i energetyka rolnictwa. Motorization and power industry in agriculture. – Lublin. – V. 14, № 5, 53-56.
2. А.с. 1297889 СССР, МКИ В 01 D 23/10. Радиальный фильтр. – 3750826/23-26; Заявл. 06.06.84; Оpubл. 23.03.87, Бюл. №11. – 3 с.
3. А.с. 1722529 СССР, МКИ В 01 D 24/08. Радиальный двухслойный фильтр. – 4764772/26; Заявл. 04.12.89; Оpubл. 30.03.92, Бюл. №12. – 2 с.
4. Грабовський П.О., Гурінчик Н.О. 2006 Чисельна реалізація математичної моделі фільтрування // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки. - - Вип. 6. - 4-13.
5. Грабовский П.А., Ларкина Г.М., Прогульный В.И. 2012 Промывка водоочистных фильтров. – Одесса: Оптимум. – 240.
6. Гурінчик Н.О. 2010 Моделювання та розрахунки очищення води фільтруванням зі швидкістю, що спадає : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.04 «Водопостачання, каналізація». - Одеса. - 21.
7. Довнорович С., Щигала Э. 2007 Определение параметров фильтрации флотационных хвостов обогатительных фабрик комбината «Польская медь» // Обогащение руд. - №3. – 37 – 41.
8. Епоян С.М., Кологитло В.Д., Друшляк О.Г., Сухоруков Г.І., Айрапетян Т.С. 2010 Водопостачання та очистка природних вод: Навчальний посібник – Х: Фактор. - 192.
9. Журба М.Г., Соколов Л.И., Говорова Ж.М. 2010 Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: в 3 т. Т.2. Очистка и кондиционирование природных вод. – изд. 3-е, перераб. и доп.: Учеб. пособие. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов. – 552.
10. Минц Д.М. 1964 Теоретические основы технологии очистки воды. – М.: Стройиздат. – 156.
11. Нестер А.А., Демчик С.П., Смирнов А.Г. Статистическая интерпретация модели фильтрования // Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология: Матер. 3-ей Всероссийской студ. науч.-техн. конф., 23-25 мая 2012 г., Казань [Электронный ресурс]. – Режим доступа к информации: <http://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=47032>
12. Олейник А.Я., Тугай А.М. 2001 Моделирование процессов кольматажа и суффозии в прифильтровой зоне скважин // Доповіди НАН України. - №9. – 190-194.
13. Паболков В.В. 2013 Особенности промывки многослойных фильтров с горизонтальным направлением фильтрации // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ. – Вип. 72. – 409-413.
14. Папков С.О., Рудов Ю.М. 2003 Математическая модель фильтрования через двухслойный крупнозернистый фильтр // Вестник СевГТУ [Электронный ресурс]. - Севастополь: Изд-во СевНТУ. - Вып. 43:Физика и математика. - 109-114. - Режим доступа до інформації: <http://178.219.241.250/jspui/bitstream/123456789/1682/1/vestn43.2003.Physics.109-114.pdf>
15. Пат. 101111 Україна, МПК В01D24/02. Багатошаровий фільтр для очищення води / Епоян С.М., Карагяур А.С., Паболков В.В.; заявник та патентовласник Харківський нац. ун-т будівництва та архітектури. - № а 2011 13969; заявл. 28.11.2011; опубл. 25.02.2013, Бюл. №4, 2013 р.
16. Поляков В.Л. 2007 Моделирование осветления суспензий в зернистых загрузках при нелинейной фильтрации // Коммунальное хозяйство городов. Научн. техн. сб. ХНАГХ. – К.: Техніка., – Вып. 74. – 222-230.
17. Поляков В.Л. 2009 Теоретический анализ длительности фильтроцикла // Хімія і технологія води [Електронний ресурс]. –Т.31 – №. 6. – 605-618. - Режим доступа до інформації: http://archive.nbu.gov.ua/portal/chem_biol/khtv/2009_6/pdf/01polyakov.pdf
18. Поляков В.Л., Шевчук Е.А. 2007 Расчет ступенного фильтрования суспензий через зернистые загрузки // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. – Вип. 4(40), Ч.2, Рівне. – 544-553.
19. Саргсян А.А. 2004 Основные закономерности фильтрования при нелинейном законе фильтрации // Изв. НАН РА и ГИУА, Сер. ТН [Электронный ресурс]. – Т.LVII – №. 3. – 550-554. - Режим доступа до інформації: http://tech.asj-oa.am/2517/1/allN32004_split%2826%29.pdf
20. Тугай А.М., Орлов В.О. 2009 Водопостачання: Підручник. – К.: Знання. – 735.
21. Шевчук О.О. 2010 Інтенсифікація роботи багатоступеневих фільтрів з зернистим завантаженням: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.04 «Водопостачання, каналізація». - Київ. - 20.
22. Фрог Б.Н., Левченко А.П. 1996 Водоподготовка: Учебн. пособие для вузов – М.: Издательство МГУ. – 680.
23. Епоян С.М., Карагяур А.С., Паболков В.В. 2013 Конструктивные особенности фильтров с

- горизонтальным направлением фильтрации // Сучасні проблеми охорони довкілля та раціонального використання ресурсів у водному господарстві: Матер. практ. конф., 22-26 квітня 2013 р. м. Миргород. - К.: Товариство «Знання України». – 51-53.
24. Эпоян С.М., Карагяур А.С., Паболков В.В. 2012 Математическая модель работы многослойного фильтра с горизонтальным направлением фильтрации. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ. – Вип. 69. – 303-307.
25. Эпоян С.М., Карагяур А.С., Паболков В.В., Ушкварок А.Е. 2012 Усовершенствование конструкции многослойного скорого фильтра // Науковий вісник будівництва. – ХНУБА, ХОТВ АБУ. – Вип. 68. – 284-288.
- SELECTION OF FILTER LOADING FOR MULTILAYER FILTERS WITH HORIZONTAL FILTERING
- Summary.** The results of theoretical studies of the influence of filter loading parameters on the efficiency of multilayer filter with horizontal filtering.
- Key words:** filtering, grain diameter, porosity, filter loading, multilayer filter.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТА ГАЗОВОГО ЭЖЕКТОРА ДЛЯ СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ

Александр Редько, Елена Бабенко

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

Адрес: Украина, г. Харьков, ул. Сумская, 40

E-mail: eobabenko@gmail.com

Аннотация. Усовершенствование метода расчета коэффициента эжекции на основании учёта реальных свойств газа позволит с большей точностью определять достижимые параметры на выходе из аппарата в тех областях, где применение законов для идеального газа не даёт точных результатов. В рамках статьи рассмотрен однофазный газовый эжектор с расширяющимся соплом Лавала и цилиндрической камерой смешения.

Ключевые слова: газодинамические функции, реальный газ, эжектор.

ВВЕДЕНИЕ

В системах газоснабжения эжекторы используются в качестве экологически чистого и энергосберегающего оборудования компримирования газа. Газовый эжектор по конструкции является достаточно простым аппаратом, но газодинамические процессы, происходящие в нем, являются достаточно сложными. Изучению их посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ, предложены различные теории и методы расчета. Теория газоструйных аппаратов находится в стадии развития и в настоящее время методы расчета не всегда отражают реальной совокупности явлений, происходящих в аппаратах. Незавершенность теории газовых эжекторов является причиной того, что отсутствует общая методика, которая позволила бы более полно учитывать процессы, происходящие в аппарате.

Эжекторное оборудование широко используется в различных областях. Наиболее типичным является их применение в эжекторных системах охлаждения двигателей, в паротурбинных установках, в кондиционерах и даже в бытовых пульверизаторах и газовых горелках. Эжекторы используются для вентиляции помещений, откачки горячих газов, отвода отработанных газов, распыления масел и мазута в форсунках. Аппараты со струйными течениями дают возможность проведения в них одновременно нескольких технологических процессов, например, абсорбции и сжатия газа, вакуумирования и охлаждения, очистки газа от примесей, его охлаждения и сжатие.

В настоящее время эжекторы в системах газоснабжения применяются:

- для откачки паров одоранта из емкостей на газораспределительных станциях [13],
- для утилизации газа выветривания, дегазации, факельных газов,
- для увеличения пропускной способности газопровода,
- для откачки газа из трубопроводов при остановке их на профилактику и ремонт,

- для создания вакуума в различных технологических аппаратах и подачи откачанного газа потребителю,
- для снижения давления природного газа вместо традиционных регуляторов давления [2], [6] на газораспределительных станциях с возможностью утилизации избыточного давления,
- для объединения потоков разных давлений для увеличения продуктивности газопроводов,
- и др.

Применение эжекторов в системах газоснабжения имеет следующие преимущества:

- использование существующей энергии природного газа,
- снижение отрицательного воздействия на окружающую среду благодаря отсутствию выбросов загрязнителей (углеводородов),
- использование существующего газопровода для транспортировки газа,
- минимизация в обслуживании,
- высокая надежность при эксплуатации,
- отсутствие подвижных элементов,
- простота конструкции,
- минимальные вложения при изготовлении и вводе в эксплуатацию.

К описанным областям применения струйных аппаратов в газовой промышленности преимущественно относятся эжектора, обладающие большой степенью расширения рабочей среды и умеренной степенью сжатия эжектируемой среды. Данными характеристиками обладают равнофазные струйные компрессоры (эжекторы), где не происходит изменения агрегатного состояния сред, с цилиндрической камерой смешения, что является наиболее общим случаем применения газовых эжекторов. Среди огромного многообразия эжекторной техники в системе газоснабжения наибольшее распространение получили газо-газовые струйные аппараты со сверхзвуковым соплом.

Среди недостатков эжекторной техники отмечают следующие: высокие уровни шума, низкий коэффициент полезного действия (КПД), ограничения по производительности устройства,

снижение КПД с увеличением производительности и т.д. [5].

Использование аппаратов со струйными течениями позволяет создавать простые технологические установки, имеющие ряд преимуществ перед традиционными. Создание и применение новых процессов, аппаратов и установок со струйными течениями требуют решения конструкторских, технологических и оптимизационных задач, при выполнении которых определяются их основные размеры, обеспечивающие максимальную эффективность технологических процессов, а также находятся значения параметров этих процессов на выходе из аппаратов и установок. Кроме того, необходимо рассчитывать распределение по поперечным сечениям струйных течений следующих величин: количеств взаимодействующих сред, их скоростей, температур, давлений, плотностей, энтальпий и других величин термодинамических и физических параметров [5]. Недостаточно полная изученность термогазодинамических и тепломассообменных процессов в струйных течениях приводит к тому, что эффективность аппаратов и установок с этими течениями часто оказывается ниже расчетных величин. Несовершенство существующих методов расчетов процессов в струйных течениях приводит к ошибкам при определении технологических параметров данных аппаратов [5].

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Теория и расчет стационарных режимов работы газовых эжекторов при заданном противодавлении на базе уравнений количества движения были созданы академиком С.А. Христиановичем [17], [18]. Это было первое теоретическое исследование газовых эжекторов с цилиндрической камерой смешения при больших значениях отношений полных давлений газов, когда существует вероятность влияния сжимаемости газов. Получены уравнения эжекции, связывающие параметры газов во входном и выходном сечениях камеры смешения. Для случая эжектора с сужающимся соплом получены дополнительные условия, которые определяют параметры газов на срезе сопла. Однако в предложенном методе не были использованы условия, ограничивающие область возможного изменения относительной скорости низконапорного газа на входе в камеру смешения. Позже М.Д. Миллионщиковым и Г.М. Рябинковым [12] была уточнена данная теория и впервые был обнаружен предельный режим работы газового эжектора, названный критическим режимом. Это обусловило проведение большого количества теоретических и экспериментальных исследовательских работ газовых эжекторов, которые позже были опубликованы Центральным аэро-гидродинамическим институтом и вошли в

"Сборник работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов" (1961 г.). На основе обобщения результатов исследования газодинамики базовых эжекторов были разработаны различные инструкции по расчету, использованию эжекторов (при участии И.Г. Портнова [9], [20], И.Н. Царева [19] и др.). В основе данных методик лежат уравнения и газодинамические функции для идеального газа, однако в некоторых работах отмечено влияние фактора сжимаемости газа при больших перепадах давления и предложены поправки на сжимаемость газа [1, 7].

Использование методов расчета эжекторов на базе уравнений количества движения позволяет найти внешние характеристики эжекторов, но не раскрывает внутренних процессов эжектирования и не дает достаточного согласования с опытными данными. Методы расчета на основе уравнений баланса энергии являются сложными и не могут охватить всего разнообразия струйных аппаратов и режимов их работы. Процессы, которые проходят в эжекторе, настолько сложны, что использование для расчета данной теории приводит к принятию ряда допущений. Считается, что лучшее совпадение с опытными данными имеют методы расчета, основанные на совместном решении уравнений количества движения и баланса энергии. Поэтому в данной работе за основу для расчета была взята методика на базе работ Е.Я. Соколова и Н.М. Зингера [15]. Она базируется на газодинамических функциях и обобщенных экспериментальных данных. Данная методика получила наибольшее распространение на практике. Однако, все расчетные соотношения получены авторами в предположении, что активная, пассивная среда и смесь потоков на выходе аппарата подчиняются уравнению состояния идеального газа. Процессы, протекающие в аппаратах, рассматриваются как реальные, а среды считаются идеальными.

Применение в расчетах реальных свойств газов возможно в методах, основанных на законах сохранения энергии и импульса. Данные методы оперируют реальными свойствами газов практически в явном виде, в отличие от газодинамической методики (Е.Я. Соколова и Н.М. Зингера), которая базируется на этих же законах сохранения, но оперирует ими в неявном виде, через газодинамические функции. Например, в работах П.Н. Каменева [10], М.П. Вукаловича и И.И. Новикова [3] термодинамический метод расчета струйного компрессора позволяет привлечь к расчету свойства реального газа, чего нет в методике, основанной на газодинамических функциях. Но в термодинамическом методе не учитывается повышение давления среды непосредственно в цилиндрической камере смешения за счет выравнивания профиля скоростей потока по сечению. То есть считается, что процесс в цилиндрической камере смешения протекает при

постоянном давлении. Это в расчете приводит к тому, что в начале диффузора получается завышенная скорость по сравнению с действительной, а, следовательно, при заданном коэффициенте скорости диффузора получаются завышенные потери в диффузоре, и, как результат, заниженное давление на выходе аппарата.

В реальных газах отклонения от идеального поведения становятся заметными при высоких давлениях и низких температурах, особенно когда газ близок к конденсации. Уравнение состояния устанавливает функциональную связь между давлением (p , МПа), удельным объемом (v , м³/кг) и температурой (T , К) газа в состоянии равновесия. Наиболее удобной мерой неидеальности является коэффициент сжимаемости (z):

$$z = pv / RT, \tag{1}$$

где R – универсальная газовая постоянная, Дж/кг·К.

Очевидно, при $z = 1$ формула (1) приобретает вид соотношения для идеального газа.

Уравнение состояния в аналитической форме содержит информацию о свойствах вещества. К уравнениям состояния, которые описывают природный газ при высоких давлениях, можно отнести следующие:

– NX19 мод., GERG-91 мод., AGA8-92DC и ВНИЦ СМВ [4];

– "Бенедикта-Вебба-Рабина" мод. (BWR) [14].

На основании уравнений состояния рассчитываются плотность, фактор сжимаемости, показатель адиабаты.

Основываясь на термическом уравнении состояния в однофазной области ВНИЦ СМВ [4], автор [21] предлагает новые выражения для расчета термодинамических величин. Кроме этого, в статье [11] также рассматривается вопрос о выводе новых газодинамических функций с учетом реальности среды.

Отметим, что автор [11] предлагает для расчета газодинамических функций решать систему уравнений с помощью компьютерных программных продуктов, где наряду с системой уравнений в частных производных рассчитывается уравнение состояния метана [14]. Вывод основных зависимостей в [21] также основывается на соотношениях изэнтропного течения реального газа, но кроме этого автором [21] получены выражения в аналитической форме и в расчетах учтены такие важные показатели, как коэффициент сжимаемости. В таблице 1 в сравнении приведены уравнения для определения свойств реального и идеального газа.

Таблица 1. Некоторые уравнения реального и идеального газа
Table 1. Some of the equation of the real and the ideal gas

Реальный газ [21]	Реальный газ [11]	Идеальный газ [15]
Уравнение состояния		
$p / R\rho T = z(\rho, T)$, ВНИЦ СМВ [4]	$p = p(\rho, T)$, BWR [14]	$p / R\rho T = 1$
Показатель адиабаты		
$x = 1 + \frac{z}{\rho c_v \eta} \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_\rho =$ $= \frac{1}{1 - \frac{\alpha}{c_p} \sqrt{\frac{c_p - c_v}{T} \frac{c_v}{c_p}}}$	$k_v = \frac{1}{\rho \rho} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T \rho^2 - \frac{T}{c_p} \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_T^2 \right]$ $k_T = 1 / \left[1 - \frac{p}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_s \right]$	$k = \frac{c_p}{c_v}$
Критическая скорость		
$a_* = \sqrt{\frac{2\alpha_0}{1 + \beta_*} RT_0}$	–	$a_* = \sqrt{\frac{2k}{k + 1} RT_0}$
Газодинамическая функция (относительное давление)		
$\pi = \left[\frac{\alpha_0}{\alpha} \left(1 - \frac{\lambda^2}{1 + \beta_*} \right) \right]^{\frac{x}{(x-1)}}$	$\pi = \left(1 - \lambda^2 \frac{\varphi^*(k_T^* - 1)}{\psi[2 + \varphi^*(k_T^* - 1)]} \right)^{\frac{k_T^*}{k_T^* - 1}}$	$\pi = \left[1 - \frac{k - 1}{k + 1} \lambda^2 \right]^{k/(k-1)}$
Газодинамическая функция (приведенная массовая скорость)		
$q = \frac{z_*}{z} \left[\frac{\alpha_*}{\alpha} \frac{1 + \beta_* - \lambda^2}{\beta_*} \right]^{\frac{1}{(x-1)}} \lambda$	$q = \varepsilon \lambda \left(1 - \frac{\varphi^*(k_T^* - 1)}{2 + \varphi^*(k_T^* - 1)} \right)^{\frac{k_T^*}{k_T^* - 1}}$	$q = \left[\frac{k + 1}{2} \left(1 - \frac{k - 1}{k + 1} \right) \lambda^2 \right]^{1/k-1} \lambda$

где a – скорость звука, м/с,
 ρ – плотность, кг/м³,
 c_p – изобарная теплоемкость, Дж/кг·К,
 c_v – изохорная теплоемкость, Дж/кг·К,
 η – коэффициент скорости звука [21],
 α, β – безразмерные термодинамические функции [21],

\bar{k}_v, \bar{k}_T – средние значения мгновенных объемного и температурного показателей адиабаты [11],

φ^*, ψ – коэффициенты [11],

λ – относительная скорость,

ε – газодинамическая функция (относительная плотность),

(все величины с индексом "*" – для потока при критической скорости, с индексом "0" – для потока при торможении).

Известно, что газодинамические функции идеального газа имеют общий вид для различных газов и отличаются значением показателя адиабаты. Приведенные в таблице 1 аналитические выражения для идеального газа [15] получены при допущении, что показатель адиабаты не зависит от температуры и давления, т.е. газ является совершенным (идеальным). Для перехода к реальным свойствам, в [21] предлагается вместо показателя адиабаты для идеального газа использовать коэффициент x .

Согласно [21] вычисления на основе данных по термодинамическим свойствам метана показывают на весьма слабое изменение величины x в широких диапазонах давлений и температур. В диапазоне температур от 140 К до 600 К и давлений от 0,1 МПа до 100 МПа изменения коэффициента адиабаты для идеального газа (k) составляют от 1,19 до 374,95, а величина x для метана изменяется в пределах от 1,1887 до 1,3899. Столь сильные изменения величины k по давлению и по температуре не позволяют её считать константой даже в малых интервалах параметров. К тому же выражения для нахождения величины k для идеального газа не учитывают температуру газа.

Показатель адиабаты x слабо изменяется по давлению и температуре, что дает возможность считать его константой в довольно больших интервалах параметров.

Автором [11] вместо показателя адиабаты для идеального газа k предлагается использовать в расчетах мгновенные объемный (k_v) и температурный (k_T) показатели адиабаты (табл. 1).

При расчете газового эжектора предлагается использовать методику [21] для определения свойств реального газа, как наиболее удобную. Точность данной методики продемонстрирована в [21] для различных технологически важных газов, в том числе и для метана. Предложенные в [21] для реального газа газодинамические функции зависят не только от показателя адиабаты, но и от коэффициента сжимаемости, величин α и β ,

зависимости которых от давления и температуры для различных газов неодинаковы.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В технических расчетах законы для идеального газа используют в ограниченных диапазонах: при давлениях от абсолютного вакуума до 0,3 – 1 МПа (в зависимости от вида газа) и при температуре, превышающей 0 °С. Давление газа, который принимает участие в процессе эжекции, может превышать указанные границы, что обуславливает актуальность разработки методов, учитывающих неоднородность свойств реального газа в диапазоне существующих в системе газоснабжения давлений и температур. Применение существующих методов расчета эжекционных систем ограничено из-за ряда допущений в исходных уравнениях газовой динамики, что приводит к погрешностям и ошибкам. Недостаточно полная изученность термогазодинамических и теплообменных процессов во многих типах струйных течений приводят к тому, что эффективность аппаратов и установок с этими течениями оказывается ниже расчетных величин. При использовании на практике с эжекторами возникают некоторые трудности. Во время пусконаладочных испытаний эжекционных аппаратов их настраивают методом направленного подбора, ведь расчет редко в полной мере обеспечивает целевой режим работы. Неправильно подобранный режим может приводить к нестабильной работе оборудования или даже к полной остановке работы эжекционных аппаратов.

В связи с этим актуальным является разработка усовершенствованного метода расчета для анализа и оптимизации режимов работы систем эжекционных установок.

Для анализа и разработки на стадии проектирования газовых эжекторов, а также для мероприятий по повышению эффективности, была выявлена необходимость в усовершенствовании метода расчета газовых эжекторов на базе теории Е.Я. Соколова и Н.М. Зингера [15] с учетом реальных параметров газов.

Целью данной работы является усовершенствование метода расчета коэффициента эжекции на основании учёта реальных свойств газа.

Это позволит с большей точностью определять достижимые параметры на выходе из аппарата в тех областях, где применение законов для идеального газа не даёт точных результатов.

ПРИНЦИП РАБОТЫ ЭЖЕКТОРА

В рамках статьи будем рассматривать однофазный газовый эжектор с расширяющимся соплом Лавалля и цилиндрической камерой смешения.

Действие струйного насоса основывается на принципе эжекции: высокоскоростной (рабочий) газ под действием разности давлений подсасывает и передает часть энергии среде с низкими скоростями. Рабочий поток из сопла с большой скоростью попадает в приемную камеру и подсасывает низкоскоростной поток в камеру смешения (рисунок 1).

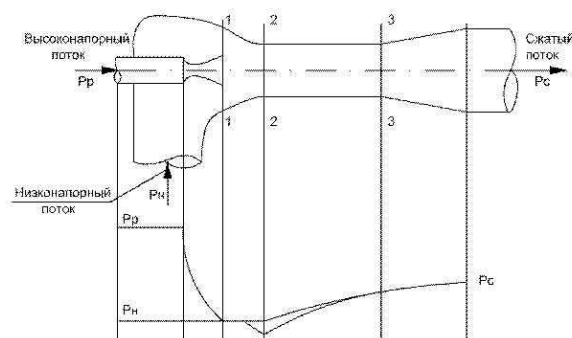


Рис. 1. Принцип работы газового эжектора

Fig. 1. The principle of operation of the gas ejector

В основном в струйных аппаратах происходит сначала преобразование потенциальной энергии рабочего потока в кинетическую, которая частично передается эжектируемому потоку. В результате в диффузоре происходит выравнивание скоростей потоков смешиваемых газов, а также обратное преобразование кинетической энергии смешанного потока в потенциальную энергию. Таким образом, происходит повышение давления за счет снижения скорости. При сжатии низконапорных газов используется потенциальная энергия высоконапорных газовых потоков, которая в существующих технологических процессах обычно безвозвратно теряется на дросселях без совершения полезной работы. Конструкция эжектора состоит из сопла, камеры смешения и диффузора.

ПУТИ ОПТИМИЗАЦИИ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЭЖЕКТОРОВ С УЧЕТОМ СВОЙСТВ РЕАЛЬНОГО ГАЗА

Основываясь на газодинамических функциях, полученных на основании соотношений термодинамики реального газа в [21], преобразуем метод расчета газовых эжекторов [15]. Как уже было отмечено, данный метод [15] часто используется на практике и получил наибольшее распространение среди других методов расчета газовых однофазных эжекторов с цилиндрической камерой смешения (что является наиболее общим случаем расчета струйных аппаратов), однако он основывается на законах для идеального газа. Базовыми в расчете являются газодинамические функции, позволяющие по параметрам газа определять относительную скорость λ на выходе аппарата и соответствующий ей коэффициент эжекции, а также, при

необходимости, проводить расчет в обратном направлении.

После преобразования метода расчета эжектора, приведенного в [15], с учетом основных соотношений для реального газа [21], были получены следующие новые уравнения для расчета коэффициента эжекции струйного насоса с учетом реальных свойств транспортируемых потоков:

$$u = \frac{K_1 \frac{a_{p^*}}{a_{c^*}} \lambda_{p,n} - K_3 \lambda_{c3}}{K_4 \lambda_{c3} - K_2 \frac{a_{n^*}}{a_{c^*}} \lambda_{n2}}, \quad (2)$$

$$K_1 = \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3, \quad (3)$$

$$K_2 = \varphi_2 \varphi_3 \varphi_4, \quad (4)$$

$$K_3 = 1 + \varphi_3 \beta_{p^*} z_{p^*} \frac{a_{p^*} p_c}{a_{c^*} p_p} \frac{\left(\pi_{c3} - \frac{p_n}{p_c} \right)}{2 \alpha_{p^*} \pi_{p^*} \lambda_{c3} q_{p,n}}, \quad (5)$$

$$K_4 = 1 + \varphi_3 \beta_{n^*} z_{n^*} \frac{a_{n^*} p_c}{a_{c^*} p_n} \frac{\left(\pi_{c3} - \pi_{c2} \right)}{2 \alpha_{n^*} \pi_{n^*} \lambda_{c3} q_{n2}}, \quad (6)$$

где φ – коэффициенты скорости

(все величины с индексом "p" – для рабочего (высоконапорного) потока, с индексом "n" – для низконапорного (эжектируемого) потока, с индексом "c" – для сжатого потока газа (смесь потоков), с индексом "1" – для потоков на выходе из сопла, с индексом "2" – для потоков во входном сечении камеры смешения, с индексом "3" – в выходном сечении камеры смешения (см. рисунок 1)).

Для расчета достижимого коэффициента эжекции необходимо определить газодинамические функции рабочего и эжектируемого потоков во входном сечении цилиндрической камеры смешения (согласно [15] обозначим как $\lambda_{p,n}$, $q_{p,n}$ и λ_{n2} , π_{n2} , q_{n2} соответственно) и смешанного потока в выходном сечении камеры смешения (λ_{c3} , π_{c3} , q_{c3}).

Формулы для расчета данных величин в предлагаемом методе примут вид, отличный от классического метода расчета. К примеру, уравнения расчета коэффициентов (5-6) согласно [15] имеют следующий вид:

$$K_3 = 1 + \varphi_3 \frac{a_{p^*} p_c}{a_{c^*} p_p} \frac{\left(\pi_{c3} - \frac{p_n}{p_c} \right)}{k_p \pi_{p^*} \lambda_{c3} q_{p,n}}, \quad (7)$$

$$K_4 = 1 + \varphi_3 \frac{a_{n^*} p_c}{a_{c^*} p_n} \frac{\left(\pi_{c3} - \pi_{c2} \right)}{k_n \pi_{n^*} \lambda_{c3} q_{n2}}. \quad (8)$$

Наличие в расчетных формулах (5-6) в предлагаемом методе таких коэффициентов как α , β , z , а также новых выражений для расчета показателя адиабаты, критической скорости и газодинамических функций (таблица 1) позволит учитывать характер поведения потоков газов в широких диапазонах.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА

Согласно методам классической теории считается, что коэффициент эжекции зависит не от абсолютных значений давления p_p , p_c и p_n , а только от степени сжатия p_c/p_n или степени расширения p_p/p_n . Для реального газа этот коэффициент существенно зависит не только от степени сжатия, но и от абсолютных значений давления. Причем при заданной степени сжатия чем выше давление, тем меньше коэффициент эжекции и тем больше он отличается от коэффициента эжекции идеального газа.

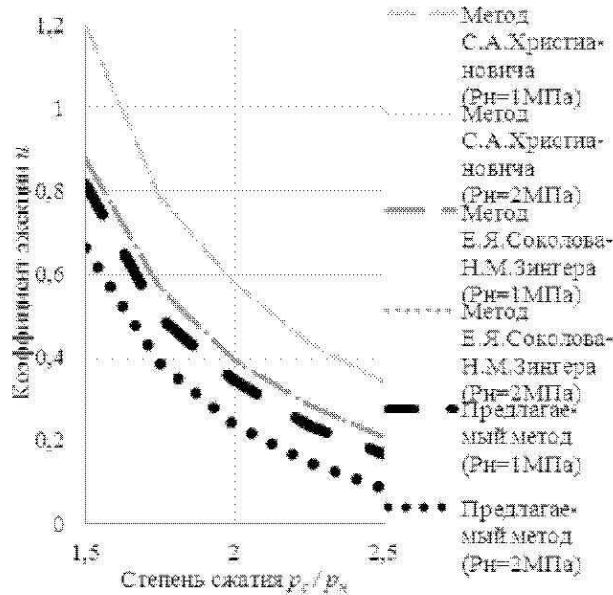


Рис. 2. Сравнительный график расчетного максимального коэффициента эжекции различными методами ($T=300\text{K}$, $p_p/p_n=7$)

Fig. 2. Comparative plot of the calculated maximum rate of ejection by different methods ($T=300\text{K}$, $p_p/p_n=7$)

Из рисунка 2 следует, что с повышением давления низконапорного газа p_n коэффициент эжекции уменьшается, в отличие от методов, основанных на классической теории. Коэффициент эжекции, рассчитанный для различных значений давления низконапорного газа по классическим методами [17], [15], остается одинаковым, что на рисунке 2 показано одной линией. Это подтверждает влияние абсолютного значения давлений на расчет, что особенно проявляется при переходе в зону высоких давлений.

Заметное влияние на расчет эжектора оказывает температура потоков газов, например, во время эжектирования газов дегазации на технологических линиях низкотемпературной сепарации. В некоторых случаях результаты расчета по предлагаемому методу при низких температурах показывают невозможность процесса эжекции в заданных условиях, в отличие от классических. Но с повышением температуры потоков газов, например,

от 260K ($\approx -13^\circ\text{C}$) до 300K ($\approx 27^\circ\text{C}$), результаты расчета по предлагаемому методу показывают повышение производительности работы аппарата и выход его на рабочий режим. Это также объясняется значительным влиянием неидеальности среды. Предлагаемый метод позволяет для различных температур рабочего и низконапорного потоков газов вычислять температуру потока на выходе аппарата.

На рисунке 3 для более легкого сравнения температуры рабочего и низконапорного потоков были выбраны одинаковыми. С понижением температуры коэффициент эжекции уменьшается. Раньше считалось, что значения температур потоков имеют незначительное влияние на процесс эжектирования и этим параметром в [17] пренебрегали. На рисунке 3 значения коэффициента эжекции, полученного методом [17], остается неизменным, независимо от изменения температуры, то есть линия проходит горизонтально. А в работе [15] уже было определено влияние температур потоков на расчет, что на рисунке 3 отражено изменением коэффициента эжекции до 2% в рассматриваемом диапазоне давлений и температур. Для предлагаемого метода эта разница уже составляет 9%. Увеличение указанной разницы по сравнению с методом [15] можно объяснить так. Показатель адиабаты, газодинамические функции и другие величины, используемые в методе [15], с изменением температуры остаются постоянными, в отличие от величин, предлагаемых к использованию в предлагаемом методе.

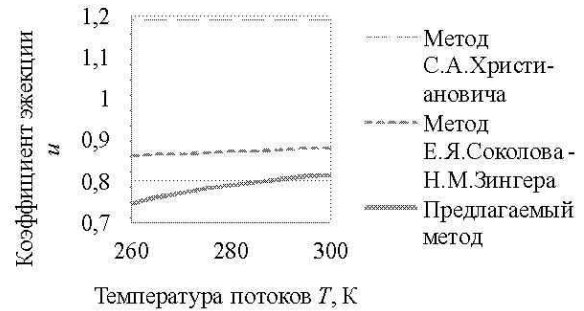


Рис. 3. Сравнительный график расчетного максимального коэффициента эжекции различными методами при $p_p/p_n=7$, $p_c/p_n=1,5$

Fig. 3. Comparative plot of the calculated maximum rate of ejection of different methods for $p_p/p_n=7$, $p_c/p_n=1,5$

Наиболее четко уменьшение реального коэффициента эжекции проявляется при давлении рабочего потока 6 МПа и выше, при повышении степени расширения p_p/p_n и при снижении температуры T .

Сравнение значений достижимого коэффициента эжекции, рассчитанного по

предлагаемому методу, с экспериментальными данными продемонстрировано на рисунке 4.

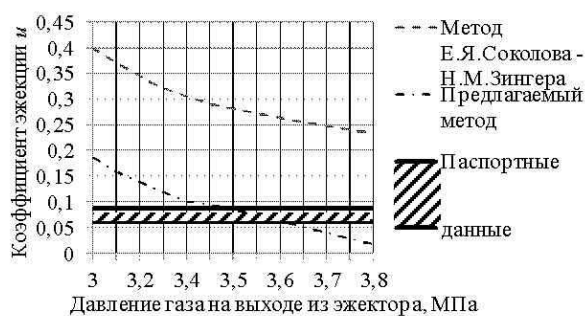


Рис. 4 Паспортные данные и расчетные значения коэффициента эжекции устройства ЕПР-9-16 при $p_p = 13$ МПа, $p_n = 1,4$ МПа

Fig. 4 Passport data and calculated values of the ejection device ЕПР-9-16 at $p_p = 13$ МПа, $p_n = 1,4$ МПа

Эжекторное устройство регулирующее ЕПР-9-16 [8] производства «Кремь» (г. Ивано-Франковск, Украина) имеет следующие паспортные характеристики:

Давление высоконапорного газа, МПа 13-13,5.
 Давление низконапорного газа, МПа 0,6-1,4.
 Давление газа на выходе эжектора, МПа 3,0-5,7.
 Коэффициент эжекции 0,06-0,0875.

На рисунке 4 отображены результаты расчетов максимального достижимого коэффициента эжекции по классическому методу и по предлагаемому, а также диапазон работы аппарата согласно паспортным данным. В определенном диапазоне давлений на выходе из аппарата значения максимального достижимого коэффициента эжекции, рассчитанного по предлагаемому методу, совпадают с паспортными данными по работе эжекторного устройства. В то время как значения, полученные в результате расчета по классической методике, существенно превышают реальные величины. При давлении газа на выходе из эжектора 3,5 МПа достижимый коэффициент эжекции, рассчитанный по классическому методу, превышает значение коэффициента эжекции по паспортным данным почти в 3 раза.

Отклонение коэффициента эжекции, рассчитанного по предлагаемому методу, от паспортных данных при некоторых давлениях объясняется рядом факторов. Во-первых, паспортное значение коэффициента эжекции приведено для рекомендуемого изготовителем рабочего режима, а по предлагаемому методу был рассчитан максимальный достижимый коэффициент. Во-вторых, конструкция ЕПР-9-16 предполагает наличие сменных сопел высокого давления и камер смешения различных диаметров. Сменные части позволяют не разбирая аппарат изменять расстояния между соплом высоконапорного газа и камерой смешения, что

влияет на геометрию аппарата и в конечном итоге дает возможность устанавливать более оптимальный режим эжектирования. Данные конструктивные изменения позволяют для указанных в паспорте давлений потоков газов выводить эжектор на рабочий режим. Аппарат, рассчитанный по предлагаемому методу, при давлении высоконапорного газа 13 МПа, низконапорного 1,4 МПа, давлении на выходе аппарата 3,5–3,6 МПа будет иметь коэффициент эжекции 0,06–0,087, что полностью соответствует паспортным данным. Степень сжатия в данном случае будет составлять $p_c/p_n = 2,5$. Как отмечено в [15], степень сжатия, развиваемая аппаратами с цилиндрической камерой смешения, обычно находится в пределах $2,5 \geq (p_c/p_n) \geq 1,2$. При повышении степени сжатия больше 2,5 оптимальной является коническая камера смешения. Расчеты эжекторов с цилиндрической камерой смешения по классическому и предлагаемому методу рекомендуется использовать при $2,5 \geq (p_c/p_n) \geq 1,2$. Эжекторное устройство ЕПР-9-16 имеет цилиндрическую камеру смешения, что подтверждает использование данных методов расчета для заданной степени сжатия $p_c/p_n = 2,5$.

Изменение каких либо параметров, пусть и в пределах, допустимых по паспорту, может привести к выводу аппарата на нерабочий режим. Так, при тех же начальных параметрах увеличение давления на выходе аппарата больше 3,6 МПа приведет к снижению коэффициента эжекции. Степень сжатия в данном случае будет превышать 2,5. Для вывода аппарата на рабочий режим необходимо либо увеличение давления на входе в эжектор, либо использование конической камеры смешения. Следовательно, предлагаемый метод расчета дает хорошее совпадение с паспортными данными эжекторного устройства ЕПР-9-16 при расчетном режиме, когда степень сжатия находится в пределах $2,5 \geq (p_c/p_n) \geq 1,2$.

Таким образом, в определенном диапазоне давлений расчет достижимого коэффициента эжекции ЕПР-9-16 по предлагаемому методу продемонстрировал соответствие паспортным данным. При тех же условиях в результате расчета по классическому методу был получен завышенный коэффициент эжекции почти в 3 раза. Это является следствием влияния неидеальности среды при высоком давлении рабочего потока газа.

ВЫВОДЫ

В результате был усовершенствован метод расчета коэффициента эжекции, предложенный в работе Е.Я. Соколова и Н.М. Зингера [15]. В основу усовершенствования положены соотношения для реального газа, выведенные А.М. Шехтманом [21]. Полученный метод позволяет учесть дополнительные потери в аппарате, связанные со свойствами реальных газов в областях высокого

давления. Данный метод позволяет вычислять максимальный коэффициент эжекции для заданного режима работы. Наиболее четко уменьшение реального коэффициента эжекции проявляется при давлении рабочего (высоконапорного) потока 6 МПа и выше, при повышении степени расширения p_p/p_n и при снижении температуры T . В результате, использование в расчете классических методов для данных условий работы может привести к внедрению в системе газоснабжения аппарата с заниженной производительностью. Снижение производительности аппарата влечет за собой увеличение расходов на транспорт газа. В случае если эжектор на практике не будет отвечать проектным требованиям, то для вывода его на расчетный режим работы необходимо изменить параметры газа на входе в эжектор. Этого можно достичь, увеличив давление или расход газа на входе в газораспределительную станцию, что приведет к соответствующим затратам. Предлагаемый метод расчета должен упростить ввод в эксплуатацию эжекционного оборудования и повысит точность заказа конкретного эжектора для заданных условий его работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович Г. Н. 1969. Прикладная газовая динамика / Г. Н. Абрамович. – М.: Наука. – 824.
2. Ванев С., Финкельштейн З., 2011. Области рационального использования пневмоагрегатов с вихревыми и струйно-реактивными турбинами. MOTROL. – Commission of motorization and energetics in agriculture : Polish Academy of sciences. – Lublin. – Vol. 13C. – 128–137.
3. Вукалович М. П. 1968. Техническая термодинамика / М. П. Вукалович, И. И. Новиков – М.: Энергия. – 496.
4. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости : ГОСТ 30319.2-96. – Введ. 1997-07-01. – Минск: Изд-во стандартов, 1997. – 54. – (Межгосударственный стандарт).
5. Галустов В. С. 2005. О пароводяных смесительных подогревателях, утилизаторах и струйной технике / В.С. Галустов // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. – №6. – 56-59.
6. Гуров В. 2001. Технологии оборонного комплекса в малой энергетике / В. Гуров, Е. Джамай // Двигатель. – №2 (14). – 36-38.
7. Дейч М. Е. 1974. Техническая газодинамика / М. Е. Дейч. – М.: Энергия. – 592.
8. Эжекторный пристрой регулирующий ЕПР-9-16 : Паспорт ЕПР-9-16-00.00.000ПС. – 2000. – 5.
9. Инструкция по расчету и применению газовых эжекторов: Утв. Техн. Упр. Главгаза СССР 27.05.58 / ГНИИНТИ. – М., 1958. – 56.
10. Каменев П. Н. 1950. Гидроэлеваторы и другие струйные аппараты / П. Н. Каменев – М.: Изд-во министерства строительства предприятий машиностроения. – 347.
11. Мальханов В. П. 1981. К вопросу об изэнтропических формулах / В. П. Мальханов // Проблемы машиностроения. – К.: Наукова думка. – вып. 14. – 92-95.
12. Миллионщиков М. Д. 1961. Газовые эжекторы больших скоростей / М. Д. Миллионщиков, Г. М. Рябинков // Сборник работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов. – БНИ ЦАГИ. – 5-32.
13. Пат. 239947 Российская Федерация, МПК G05D7/00. Одоризатор природного газа / Громов В. С.; Зарецкий Я. В.; Серазетдинов Б. Ф.; Серазетдинов Ф. Ш.; Кривошеев А. И.; Тонконог В. Г.; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Нейт". – № 2009131094/28 ; заявл. 14.08.2009 ; опубл. 20.09.2010.
14. Рид Р. 1982. Свойства газов и жидкостей. Справочное пособие / Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. – Л.: Химия. – 592.
15. Соколов Е. Я. 1989. Струйные аппараты / Е. Я. Соколов, Н. М. Зингер. – М.: Энергоатомиздат. – 352.
16. Математическое моделирование нелинейных термогазодинамических процессов в многокомпонентных струйных течениях / Л. П. Холпанов, Е. П. Запорожец, Г. К. Зиберт, Ю. А. Кащицкий. – М.: Наука, 1998. – 320.
17. Христианович С. А. 1944. О расчете эжектора / С. А. Христианович // Промышленная аэродинамика: Сб. – М.: БНИ ЦАГИ. – 28.
18. Христианович С. А. 1946. Применение эжекторов в газосборных сетях / С. А. Христианович // Изв. АН СССР. – №3. 313-328.
19. Царев И. Н. 1998. Энергосберегающие технологии с использованием эжекторов больших скоростей / И. Н. Царев // Наука о природном газе. Настоящее и будущее. Сборник научных трудов. – М. – 224-234.
20. Чарный И. А. 1961. Основы газовой динамики / И. А. Чарный – М.: Гостоптехиздат. – 200.
21. Шехтман А. М. 1988. Газодинамические функции реальных газов. Справочник / А. М. Шехтман. – М.: Энергоатомиздат. – 170.

IMPROVEMENT IN THE CALCULATION OF GAS EJECTOR FOR GAS SUPPLY SYSTEMS

Summary. Improvement of the method of calculating ejection coefficient on the basis of records of real gas properties will more accurately determine the achievable output parameters of the device in areas where the application of the ideal gas law does not give accurate results. Within the article, we discuss single-phase gas ejector with an expanding Laval nozzle and a cylindrical mixing chamber.

Key words: gas-dynamic function, the real gas, ejector.

ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ

Аубекир Найманов, Юлия Гостева

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры
Адрес: Украина, Донецкая область, г. Макеевка, 86123, ул. Державина, 2.

Аннотация. Приведена методика оценки надежности насосной станции. Для расчета показателей надежности рекомендовано использование формулы полной вероятности. Рассмотрена процедура оценки надежности блока насосных агрегатов; представлены расчетные зависимости для вычисления параметров надежности при различных вариантах количества рабочих и резервных агрегатов. Показана возможность определения межремонтного периода насосных агрегатов.

Ключевые слова: насосная станция, насосно-силовой агрегат, надёжность, резервирование, структурно-логическая схема, методы оценки надежности, коэффициент готовности, вероятность безотказной работы, продолжительность межремонтного периода

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Насосные станции являются одним из наиболее ответственных элементов систем водоснабжения и водоотведения. Они с определенной вероятностью не должны допускать перерывов в подаче воды либо эти перерывы должны быть не более одних суток. Отказы насосных станций весьма болезненно сказываются на уровне функционирования систем, поскольку насосные станции являются частью системы подачи воды в системах водоснабжения и их отказ может привести к отказу всей системы, что, в свою очередь, приводит к значительным материальным и финансовым потерям. Таким образом, возникает необходимость в изучении методов оценки надежности насосных станций и методов повышения их надежности.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Вопросам надежности уделялось значительное внимание в научно-технической литературе, в частности, в работах [8, 9, 10, 13, 23, 7, 22, 4, 5, 15, 14]. К числу основных параметров надежности насосных станций обычно относят вероятность безотказного действия P , коэффициент готовности K_g , среднюю наработку на отказ T_o и среднее время восстановления (перерыва в работе) T_B . Однако, предлагаемые в литературе расчетные зависимости для оценки одних параметров надежности насосных станций - не вполне удобны и громоздки, для других - зачастую не приводятся.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель работы заключается в получении расчетных зависимостей для оценки параметров надежности насосных станций при различном

количестве рабочих и резервных агрегатов в блоках насосно-силовых агрегатов, а также определении межремонтного периода насосных агрегатов

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Общепринято представлять насосную станцию при оценке надежности как техническую систему, состоящую из трех последовательно соединенных частей:

- строительной (фундаменты, стены, перекрытия);
 - технологической или механической (насосы, трубопроводы, задвижки и обратные клапаны);
 - электрической (электродвигатели, трансформаторы, пускорегулирующие устройства, элементы автоматики и линии электропередач).
- Отказы наблюдаются, соответственно, во всех трех частях, но имеют весьма различную интенсивность. Оценка надежности каждой части производится отдельно.

В строительной части отказы считаются весьма редкими и при оценке надежности обычно предлагается их не учитывать. В частности, вероятность отказа строительной части зданий и сооружений систем водоснабжения и канализации рекомендуется принимать равной $1 \cdot 10^{-4}$ ($Q_{стр} = 0,0001$) [3], а вероятность безотказной работы $P_{стр} = 0,9999$. В то же время при конструировании строительной части станции иногда применяется ряд мер, которые способны предотвратить затопление машинного зала заглубленных насосных станций при внезапном нарушении целостности внутристанционных трубопроводов и арматуры. К этим мерам относят: разделение машинного зала глухой перегородкой на два независимых отделения, устройство выпуска большого диаметра из машинного зала или установка дренажного насоса большой производительности с автоматическим включением. Все это приближает

надежность строительной части к единице и допустимо принимать $P_{стр} \approx 1$, $K_{э(стр)} \approx 1$.

Отказы технологической части наблюдаются значительно чаще. Считается, что именно они играют определяющую роль в надежности насосной станции. Наиболее подробные данные по параметрам надежности насосов различных марок и оборудования приведены в работах Ильина Ю. А. [8, 9].

Отказы электрической части считаются значительно более редкими, чем технологической части [10, 23]. В частности, для электродвигателей Ильин Ю. А. приводит величину интенсивности отказов $\lambda = 0,26 \cdot 10^{-4}$ 1/ч [8, 9]; такое же значение приводит и Ионин А. А. [10]. Следует отметить, что интенсивность отказов всего блока внешнего электроснабжения примерно в два раза меньше интенсивности отказов насосно-силовых агрегатов, а продолжительность восстановления составляет 1-2 часа. Коэффициент готовности блока внешнего электроснабжения составляет не менее $K_g = 0,998$ [23]. В связи с этим, оценку надежности электрической части рекомендуется проводить только при очень высоких требованиях к бесперебойности подачи воды. В остальных случаях считается допустимым принимать вероятность безотказной работы электрической части $P_{эл} \approx 1$ и коэффициент готовности $K_{э(эл)} \approx 1$.

Итак, по мнению целого ряда специалистов, при оценке надежности насосных станций достаточно ограничиться оценкой технологической части станций. Отличительной особенностью этой части является применение в ней двух различных видов резервирования:

- постоянного в трубопроводной обвязке станции;
- замещением в блоке насосных агрегатов.

В связи с этим целесообразно технологическую часть насосной станции

представлять состоящей из трех последовательно соединенных блоков:

- блока всасывающих трубопроводов;
- блока насосных агрегатов;
- блока трубопроводов с напорной стороны.

Оценка надежности каждого блока выполняется отдельно.

Блоки всасывающих и напорных трубопроводов должны обеспечить бесперебойный подвод и отвод воды к блоку насосных агрегатов. Такое требование позволяет считать обвязку аналогом магистральной водопроводной сети города. В литературе обычно рекомендуется для повышения надежности предусматривать, по возможности, отдельную всасывающую линию к каждому насосу. В этом случае каждый насос работает как самостоятельная насосная станция и отказ одной станции не влияет на работу остальных станций. Применение самостоятельных всасывающих линий к каждому насосу практикуется на насосных станциях промышленного оборотного водоснабжения при высоких требованиях к бесперебойности подачи воды. В таком случае надежность отвода воды от насосов может обеспечить кольцевой напорный коллектор, при этом секционирующие задвижки на кольце должны быть сдвоенны. Подобная схема для трех насосов и двух напорных водоводов приведена на рис. 1.

Демонтаж, с целью ремонта, любой задвижки или отказ любого участка коллектора вызовет зависимый отказ не более одного насоса или одного напорного водовода. Аналогичные схемы могут быть составлены для любого количества насосов и водоводов. Подобной же может быть принята схема обвязки и с всасывающей стороны.

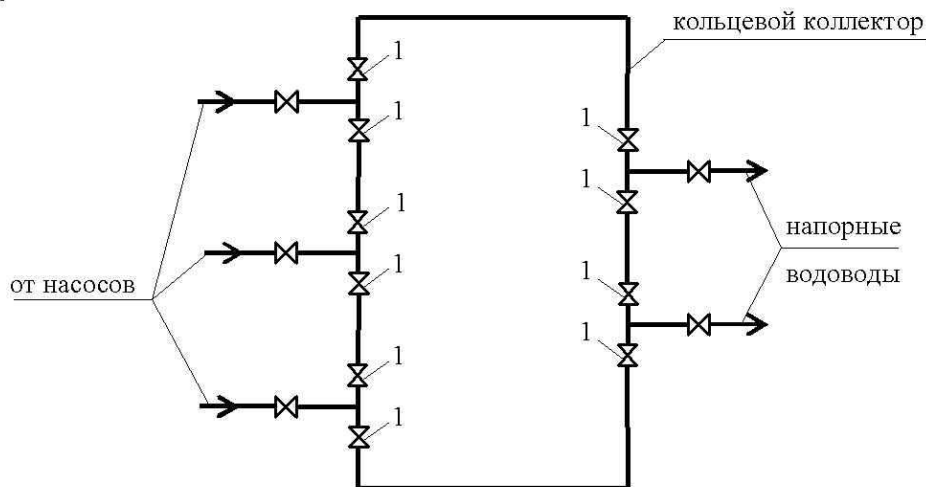


Рис. 1. Схема кольцевого коллектора со сдвоенными секционирующими задвижками:

1 – секционирующие задвижки

Fig. 1. The scheme of the annular manifold with dual valves that separate each section:

1 - valve that separates each section

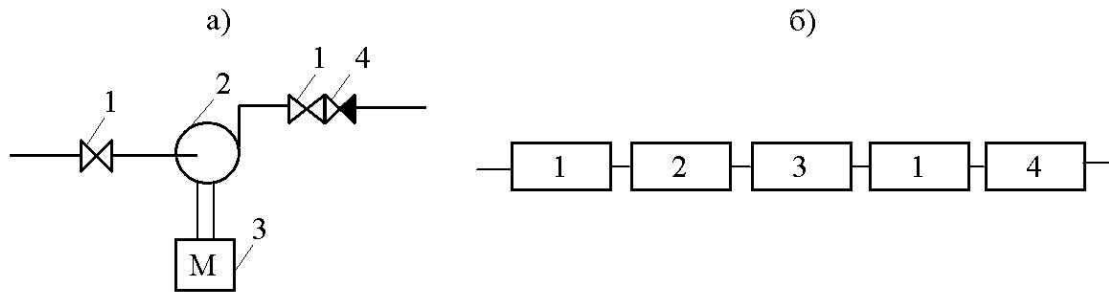


Рис. 2. Схема насосно-силового агрегата (а) и его структурно-логическая схема (б):
 1 – задвижка; 2 – насос; 3 – электродвигатель; 4 – обратный клапан
 Fig. 2. The scheme of pumping and power unit (s) and its structure-logic scheme (b):
 1 - valve, 2 - pump, 3 - electric motor, 4 - check valve

Составление структурно-логической схемы блоков трубопроводной обвязки и расчет их надежности могут выполняться по уже известным зависимостям [10, 13]. В то же время применение В. Г. Новохатним эвристического метода при оценке надежности насосных станций представляется довольно спорным.

В понятие «насосный агрегат» Ионин А. А. [10] предлагает включать пять последовательно соединенных элементов: задвижку на всасывающей стороне, насос, электродвигатель, задвижку на напорной стороне и обратный клапан (рис. 2).

При оценке надежности насосных станций литературные источники обычно рекомендуют использовать надежность насосного агрегата. Иногда электродвигатель не включают в расчет надежности технологической части. Надежность агрегата легко вычисляется по известным формулам для системы с последовательным соединением элементов в структурно-логической схеме:

$$P_{agr} = P_1^2 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4,$$

$$K_{z(agr)} = K_{z(1)}^2 \cdot K_{z(2)} \cdot K_{z(3)} \cdot K_{z(4)}.$$

Коэффициент готовности любого элемента вычисляется по формуле:

$$RF$$

где μ - интенсивность восстановления элемента, 1/ч;

λ - интенсивность отказов элемента, 1/ч.

Вероятность безотказной работы элемента:

$$P_i = e^{-\lambda t},$$

здесь t - продолжительность эксплуатации элемента от момента начала эксплуатации (для нового элемента) или от момента окончания ремонта (для ненового элемента).

Величины λ и μ для элементов систем водоснабжения могут приниматься по данным Ильина Ю. А. [8, 9]. Отметим, что величина K_z является стационарной оценкой, т. е. не меняется в течение времени эксплуатации, а P - нестационарной.

Особенностью насосной станции является то, что насосные агрегаты резервируются замещением. Это делает неприменимыми обычные методы составления структурно-логических схем, а также метод структурной декомпозиции и эквивалентирования. Одним из методов оценки надежности блока насосных агрегатов может быть использование формулы полной вероятности, которая рекомендуется теорией надежности при резервировании замещением [2]. Структурно-логическую схему блока насосных агрегатов при резервировании замещением и наличии n рабочих и m резервных однотипных агрегатов можно представить в следующем виде (рис. 3):



Рис. 3. Структурно-логическая схема блока насосных агрегатов
Fig. 3. Structure-logic scheme of pumping and power units

Резервные агрегаты находятся в режиме ожидания и могут быть включены вместо любого отказавшего рабочего агрегата. Все агрегаты однотипны.

Вероятность нахождения данной системы в работоспособном состоянии равна сумме вероятностей всех возможных работоспособных состояний.

Для системы с n рабочими и m резервными агрегатами при однотипных агрегатах таких состояний может быть $(m + 1)$:

1. Все $(n + m)$ агрегатов работоспособны (исправны).
2. Один агрегат неработоспособен (неисправен), число исправных агрегатов равно $[(n + m) - 1]$.
3. Два агрегата неисправны, число исправных агрегатов равно $[(n + m) - 2]$.
- ...
- ...
- ...

$(m + 1)$. Неработоспособны m агрегатов, число исправных агрегатов равно n .

Если число неработоспособных агрегатов будет больше, чем число резервных агрегатов m , то число работающих агрегатов станет меньше n , и насосная станция не будет подавать расчетный расход воды, что означает параметрический отказ насосной станции.

Формула полной вероятности работоспособного состояния системы имеет следующий вид:

$$P_{\text{сист}} = \sum_{i=n}^{i=n+m} C_{(n+m)}^i \cdot P^i \cdot (1 - P)^{[(n+m)-i]}, \quad (1)$$

здесь: $P_{\text{сист}}$ - вероятность работоспособного состояния системы;

i - количество исправных элементов;

n - число рабочих элементов;

m - число резервных элементов;

$C_{(n+m)}^i$ - число перестановок из общего количества элементов $(n + m)$ по количеству исправных агрегатов i , $C_{(n+m)}^i = \frac{(n + m)!}{i! [(n + m) - i]!}$,

P - вероятность работоспособного состояния одного элемента;

$(1 - P)$ - вероятность неработоспособного состояния элемента.

Подобный формуле (1) вид имеет и зависимость, полученная Стрельниковым В. П. [21] на основе аппарата функций случайных параметров.

При подстановке в формулу (1) в качестве P вероятности безотказного состояния насосного агрегата $P_{\text{азр}}$, получим выражение для вероятности безотказной работы блока насосных агрегатов $P_{\text{БНА}}$:

$$P_{\text{БНА}} = \sum_{i=n}^{i=n+m} C_{(n+m)}^i \cdot P_{\text{азр}}^i \cdot (1 - P_{\text{азр}})^{[(n+m)-i]}.$$

Если же в формулу (1) подставить в качестве P коэффициент готовности насосного агрегата $K_{z(\text{азр})}$, то получим выражение для вычисления коэффициента готовности блока насосных агрегатов $K_{z(\text{БНА})}$:

$$K_{z(\text{БНА})} = \sum_{i=n}^{i=n+m} C_{(n+m)}^i \cdot K_{z(\text{азр})}^i \cdot (1 - K_{z(\text{азр})})^{[(n+m)-i]}$$

Отметим, что $P_{\text{БНА}}$ является нестационарной величиной, которая изменяется во времени; а $K_{z(\text{БНА})}$ - стационарная оценка, которая от времени в явном виде не зависит.

Используя формулу (1), можно получить расчетные зависимости для оценки надежности блока насосных агрегатов для частных случаев при разном количестве рабочих и резервных агрегатов. Удобно вместо индекса (БНА) записывать при параметрах надежности $(n + m)$, т. е. количество

рабочих и резервных агрегатов. Ниже представлена преобразованная формула (1) для наиболее часто встречающихся на практике сочетаний количества рабочих и резервных агрегатов.

1. На насосной станции один рабочий и один резервный агрегаты, $n = 1, m = 1$.

Данная система может находиться в двух работоспособных состояниях:

а) оба агрегата работоспособны, $i = 2$,

$$P_a = C_2^2 P_{azp}^2 (1 - P_{azp})^{2-2}, C_2^2 = 1,$$

$$P_a = P_{azp}^2 (1 - P_{azp})^0 = P_{azp}^2,$$

б) работоспособен один агрегат, второй – неработоспособен, $i = 1$,

$$P_6 = C_2^1 P_{azp}^1 (1 - P_{azp})^{2-1}, C_2^1 = 2,$$

$$P_6 = 2P_{azp} (1 - P_{azp}).$$

Вероятность безотказной работы блока насосных агрегатов:

$$P_{БНА} = P_{(1+1)} = P_a + P_6 = P_{azp}^2 + 2P_{azp} (1 - P_{azp}) = P_{azp} (2 - P_{azp}).$$

Коэффициент готовности блока насосных агрегатов:

$$K_{z(БНА)} = K_{z(1+1)} = K_{z(a)} + K_{z(6)} = K_{z(azp)}^2 + 2K_{z(azp)} (1 - K_{z(azp)}) = K_{z(azp)} (2 - K_{z(azp)}).$$

Что касается средней наработки на отказ T_o и среднего времени восстановления T_b , то они рассматриваются ниже отдельно.

2. На станции два рабочих и один резервный агрегат, $n = 2, m = 1$.

Данная система также может находиться в двух работоспособных состояниях:

а) все три агрегата работоспособны, $i = 3$:

$$P_a = C_3^3 P_{azp}^3 (1 - P_{azp})^{3-3}, C_3^3 = 1,$$

$$P_a = P_{azp}^3,$$

б) работоспособны 2 агрегата, а третий неработоспособен, $i = 2$:

$$P_6 = C_3^2 P_{azp}^2 (1 - P_{azp})^{3-2}, C_3^2 = 3,$$

$$P_6 = 3P_{azp}^2 (1 - P_{azp}).$$

Вероятность безотказной работы блока насосных агрегатов:

$$P_{(2+1)} = P_a + P_6 = P_{azp}^3 + 3P_{azp}^2 (1 - P_{azp}).$$

Коэффициент готовности блока насосных агрегатов:

$$K_{z(2+1)} = K_{z(a)} + K_{z(6)} = K_{z(azp)}^3 + 3K_{z(azp)}^2 (1 - K_{z(azp)}).$$

3. На станции два рабочих и два резервных агрегата, $n = 2, m = 2$.

Система может находиться в трех работоспособных состояниях:

а) все четыре агрегата работоспособны, $i = 4$:

$$P_a = C_4^4 P_{azp}^4 (1 - P_{azp})^{4-4} = P_{azp}^4,$$

б) три агрегата работоспособны, четвертый неработоспособен, $i = 3$:

$$P_6 = C_4^3 P_{azp}^3 (1 - P_{azp})^{4-3} = 4P_{azp}^3 (1 - P_{azp}),$$

в) два агрегата работоспособны, а остальные два – неработоспособны, $i = 2$:

$$P_6 = C_4^2 P_{azp}^2 (1 - P_{azp})^{4-2} = 6P_{azp}^2 (1 - P_{azp})^2.$$

Вероятность безотказного действия блока насосных агрегатов:

$$P_{(2+2)} = P_a + P_6 + P_6 = P_{azp}^4 + 4P_{azp}^3 (1 - P_{azp}) + 6P_{azp}^2 (1 - P_{azp})^2.$$

Коэффициент готовности блока насосных агрегатов:

$$K_{z(2+2)} = K_{z(a)} + K_{z(6)} + K_{z(6)} = K_{z(azp)}^4 + 4K_{z(azp)}^3 (1 - K_{z(azp)}) + 6K_{z(azp)}^2 (1 - K_{z(azp)})^2.$$

4. На станции три рабочих и два резервных агрегата, $n = 3, m = 2$.

Система может находиться в трех работоспособных состояниях:

а) все пять агрегатов работоспособны, $i = 5$,

$$P_a = P_{azp}^5,$$

б) четыре агрегата работоспособны, один – неработоспособен, $i = 4$:

$$P_6 = C_5^4 P_{azp}^4 (1 - P_{azp}) = 5P_{azp}^4 (1 - P_{azp}),$$

в) три агрегата работоспособны, два – неработоспособны, $i = 3$:

$$P_6 = C_5^3 P_{azp}^3 (1 - P_{azp})^2 = 10P_{azp}^3 (1 - P_{azp})^2.$$

Вероятность безотказного действия блока насосных агрегатов:

$$P_{(3+2)} = P_a + P_6 + P_6 = P_{azp}^5 + 5P_{azp}^4 (1 - P_{azp}) + 10P_{azp}^3 (1 - P_{azp})^2.$$

Коэффициент готовности блока насосных агрегатов:

$$K_{z(3+2)} = K_{z(a)} + K_{z(6)} + K_{z(6)} = K_{z(azp)}^5 + 5K_{z(azp)}^4 (1 - K_{z(azp)}) + 10K_{z(azp)}^3 (1 - K_{z(azp)})^2.$$

5. На насосной станции четыре рабочих и два резервных агрегата, $n = 4, m = 2$.

Возможны три безотказных состояния системы:

а) все шесть агрегатов работоспособны, $i = 6$,

$$P_a = P_{azp}^6,$$

б) пять агрегатов работоспособны, один – неработоспособен, $i = 5$:

$$P_6 = C_6^5 P_{azp}^5 (1 - P_{azp}) = 6P_{azp}^5 (1 - P_{azp}),$$

в) четыре агрегата работоспособны, два – неработоспособны, $i = 4$:

$$P_6 = C_6^4 P_{azp}^4 (1 - P_{azp})^2 = 15 P_{azp}^4 (1 - P_{azp})^2.$$

Вероятность безотказного действия блока насосных агрегатов:

$$P_{(4+2)} = P_a + P_6 + P_6 = P_{azp}^6 + 5 P_{azp}^5 (1 - P_{azp}) + 15 P_{azp}^4 (1 - P_{azp})^2.$$

Коэффициент готовности блока насосных агрегатов:

$$\begin{aligned} K_{z(4+2)} &= K_{z(a)} + K_{z(6)} + K_{z(6)} = \\ &= K_{z(azp)}^6 + 6 K_{z(azp)}^5 (1 - K_{z(azp)}) + \\ &+ 15 K_{z(azp)}^4 (1 - K_{z(azp)})^2. \end{aligned}$$

б. На насосной станции пять рабочих и два резервных агрегата, $n = 5$, $m = 2$.

Данная система также может находиться в трех работоспособных состояниях:

а) все семь агрегатов работоспособны, $i = 7$,

$$P_a = P_{azp}^7;$$

б) шесть агрегатов работоспособны, один – неработоспособен, $i = 6$:

$$P_6 = C_7^6 P_{azp}^6 (1 - P_{azp}) = 7 P_{azp}^6 (1 - P_{azp});$$

в) пять агрегатов работоспособны, два – неработоспособны, $i = 5$:

$$P_5 = C_7^5 P_{azp}^5 (1 - P_{azp})^2 = 21 P_{azp}^5 (1 - P_{azp})^2.$$

Вероятность безотказного действия блока насосных агрегатов:

$$P_{(6+2)} = P_{azp}^7 + 7 P_{azp}^6 (1 - P_{azp}) + 21 P_{azp}^5 (1 - P_{azp})^2.$$

Коэффициент готовности блока насосных агрегатов:

$$\begin{aligned} K_{z(5+2)} &= K_{z(azp)}^7 + 7 K_{z(azp)}^6 (1 - K_{z(azp)}) + \\ &+ 21 K_{z(azp)}^5 (1 - K_{z(azp)})^2. \end{aligned}$$

Аналогичные формулы могут быть составлены и для других количеств рабочих и резервных агрегатов. Количество резервных агрегатов в данных формулах принималось не более двух, поскольку СНиП 2.04.02-84 [19] не предусматривает большего количества резервных агрегатов при любом количестве рабочих агрегатов. Получаемые с помощью формулы полной вероятности зависимости для оценки параметров надежности блока насосных агрегатов достаточно просты и пригодны для инженерных расчетов. Отметим, что именно надежность блока насосных агрегатов и определяет надежность всей насосной станции. На первом этапе надежности остальных блоков могут быть приняты равными единице.

Что касается средней наработки на отказ T_o и среднего времени восстановления (простоя) T_e , то для их оценки можно привлечь следующие

соображения. В принципе, среднее время простоя нормировано постановлениями правительства по правилам оказания услуг предприятиями водоснабжения и канализации. В России допускаемый перерыв в подаче воды потребителю составляет 4 часа одновременно при аварии и 8 часов (суммарно) в месяц [18]. В Украине допустимый перерыв в подаче воды составляет не больше 6 часов в сутки и не более 2 раз в месяц, т. е. 12 часов (суммарно) в месяц [17]. Системы водоснабжения ни на какие категории не делятся в [17, 18]. Указанные цифры не согласуются с требованиями СНиП 2.04.02-84 к водопроводам I, II, III категорий, однако являются обязательными для исполнения. Таким образом, в России величина T_e в расчете на один месяц эксплуатации должна приниматься равной восьми часам, тогда $T_o = 720 - 8 = 712$ часов. В Украине же соответственно $T_e = 12$ часов, $T_o = 720 - 12 = 708$ часов. (720 – число часов в одном месяце).

Исходя из этих цифр, можно вычислить нормативные величины коэффициентов готовности насосных станций за расчетное время 1 месяц:

– для условий России:

$$K_z^{норм} = \frac{T_o}{T_o + T_e} = \frac{712}{720} = 0,9889,$$

– для условий Украины:

$$K_z^{норм} = \frac{T_o}{T_o + T_e} = \frac{708}{720} = 0,9833.$$

В то же время нормативные величины вероятности безотказного действия насосных станций вычисляются по количеству отказов в месяц, которое для условий обеих стран составляет 2 отказа в месяц. Тогда:

$$P_{норм} = \frac{30 - 2}{30} = 0,9333,$$

здесь 30 – среднее число дней работы станции за 1 месяц.

С нормативными величинами $K_z^{норм}$ и $P_{норм}$ необходимо сравнить расчетные величины $K_{z(БНА)}$ и $P_{БНА}$, полученные по формуле полной вероятности. Если расчетные значения указанных величин больше нормативных, то можно считать принятое количество рабочих и резервных насосных агрегатов достаточным для удовлетворения нормативных требований. В противном же случае надо принимать меры по повышению надежности станции – увеличить количество резервных агрегатов или применять более надежные насосные агрегаты.

Следует отметить, что используя требования СНиП 2.04.02-84 [19], можно найти допустимое количество отказов за 1 год

эксплуатации [12]. Нормативные величины коэффициентов готовности и вероятностей безотказного действия в расчете на 1 год также вычисляются путем сопоставления требований СНиП и постановлений правительства [17, 18]. Для условий Украины они составляют [12]:

- для водопровода I категории - не более 4 отказов в год; $P_{норм}^{год} = 0,989$; $K_{z(норм)}^{год} = 0,997$;
- для водопровода II категории - не более 12 отказов в год; $P_{норм}^{год} = 0,964$; $K_{z(норм)}^{год} = 0,992$;
- для водопровода III категории: не более 24 отказов в год; $P_{норм}^{год} = 0,940$; $K_{z(норм)}^{год} = 0,984$;

Таким образом, водопроводы разных категорий отличаются только допустимым количеством отказов в год, длительность же одного отказа одинакова у всех категорий.

Важной величиной для эксплуатационников является длительность межремонтного периода насосного агрегата T_M . Она определяется достаточно просто. В формуле полной вероятности для данного количества рабочих и резервных агрегатов задаем $P_{БНА} = P_{норм}$. Например, для трех рабочих и двух резервных агрегатов:

$$P_{агр}^5 + 5P_{агр}^4(1 - P_{агр}) + 10P_{агр}^3(1 - P_{агр})^2 = P_{норм} = 0,9333.$$

Отсюда находим величину $P_{агр}$, которая должна иметь место в конце межремонтного периода. Далее выражаем из формулы $P_{агр} = e^{-\lambda t}$ время t , которое и является межремонтным периодом $T_M = -\frac{\ln P_{агр}}{\lambda}$.

Величина λ принимается по справочникам для данной марки насоса.

ВЫВОДЫ

Таким образом, для практического применения предложена методика оценки надежности насосных станций. Выведены расчетные зависимости для определения коэффициентов готовности и вероятности безотказного действия блока насосно-силовых агрегатов при различных количествах рабочих и резервных агрегатов. Показана возможность определения межремонтного периода насосных агрегатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 27.003-90. Состав и общие правила задания требований по надежности.
2. Голинкевич Т. А. 1985 Прикладная теория надежности. – М.: Высшая школа. – 168.

3. ДБН В.1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ.
4. Дерюшев Л. Г. 2000 Показатели надежности трубопроводных систем водоснабжения и водоотведения // Водоснабжение и сан. техника. №12.
5. Дерюшев Л. Г., Минаев А. В. 1988 Оценка надежности систем водоснабжения // Водоснабжение и сан. техника. №11.
6. ДСТУ 2862-94. Методы расчета показателей надежности.
7. Журба М. Г., Соколов Л. И., Говорова Ж. М. 2004 Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: издание второе, переработанное и дополненное. Учебное пособие. Том 1 – М.: Издательство АСВ. – 288.
8. Ильин Ю. А. 1985 Надежность водопроводных сооружений и оборудования. - М.: Стройиздат, - 240.
9. Ильин Ю. А. 1987 Расчет надежности подачи воды. - М.: Стройиздат, - 320.
10. Ионин А. А. 1989 Надежность систем тепловых сетей. – М.: Стройиздат. – 268.
11. Карелин, В. Я. Насосы и насосные станции : учеб. для вузов по специальности "Водоснабжение и канализация" и "Рацион. исполъз. вод. ресурсов и обезвреживания пром. стоков" / В. Я. Карелин, А. В. Минаев ; науч. ред. Л. Г. Дерюшев. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М. : БАСТЕТ, 2010. – 445 с. : ил.
12. Найманов А. Я., Найманова А. А. 2013 Возможные нормативы надежности систем водоснабжения и водоотведения // Науковий вісник будівництва, Харків, Харк. нац. ун-т будівн. і арх. - №71. - 397-402.
13. Науменко И. И. Надежность сооружений гидромелиоративных систем: учебное пособие. – К.: Выща школа, 1990. – 239 с.
14. Николенко И.В., Пастушенко А.В., Котовская Е.Е. 2010 Анализ влияния условий эксплуатации насосной станции на параметры насосных агрегатов MOTROL. — Commission of motorization and energetics in agriculture : Polish Academy of sciences. — Lublin. — Vol. 12D. — 36—47.
15. Новохатний В. Г. Надежность функционирования подающе-распределительного комплекса систем водоснабжения. Авторефер. докт. дисс. Киев: Кивск. нац. ун-т строит. и арх., 2012.
16. Повысительные насосы с мокрым ротором // Сантехника, отопление, кондиционирование, 2008. – №2. – 16.
17. Правила оказания услуг по централизованному отоплению, холодному и горячему водоснабжению и водоотведению... Утверждены постановлением Кабинета Министров Украины от 21.07.2005 №630.
18. Правила предоставления коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов.

Утверждены постановлением Правительства Российской Федерации от 6 мая 2011 г. №354.

19. СНиП 2.04.02.-84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения/ Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1985. – 136.

20. Сотсков Б. С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. – М.: Высш. школа, 1970. – 270.

21. Стрельников В. П. Расчет надежности параллельных структур на основе аппарата функций случайных аргументов с использованием DN-распределения // Системотехника, №6, 2008.

22. Эксплуатация систем водоснабжения, канализации и газоснабжения: Справочник/ Под ред. В. Д. Дмитриева, Б. Г. Мишукова. - 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1988. – 383.

23. Ясин Э. М., Березин В. Л., Ращепкин К. Е. 1972 Надежность магистральных трубопроводов. – М.: изд-во «Недра». – 184.

THE POSSIBILITY OF ASSESSING OF SOME PARAMETERS THE RELIABILITY OF PUMP STATIONS.

Summary. The technique an estimation of reliability the pump station. For calculation indicators of reliability use the formula a total probability is recommended. Procedure of an estimation reliability the block pump units; settlement dependences for calculation of parameters reliability are presented at various variants of quantity working and reserve units. The possibility determining the turnaround time of pumping units.

Key words: pumping plant, pump and power unit, reliability, redundancy, structural-logic scheme, methods of estimating reliability, failure, availability factor, the probability of failure-free operation, the duration of the turnaround time

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СОРБЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ВОДЫ

Андрей Карагяур

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры
Адрес: Украина, г. Харьков, ул. Сумская, 40
E-mail: karagiaur@rambler.ru

Аннотация. Представлены теоретические предпосылки повышения эффективности очистки воды сорбцией в поле центробежных сил.

Ключевые слова: сорбция, уравнение переноса, уравнение кинетики, центрифугирующее устройство, концентрация

ВВЕДЕНИЕ

Техногенные, а также климатические факторы, такие как глобальное потепление, обуславливают ухудшение качества воды в поверхностных источниках водоснабжения. Сброс недостаточно очищенных сточных вод, увеличение температуры, зарегулирование водоемов приводят к их эвтрофикации. При этом ухудшаются органолептические свойства воды, забираемой для хозяйственно-питьевых нужд. Таким образом, проблема обеспечения населения качественной питьевой водой приобретает все большую актуальность. На сегодняшний день традиционная схема очистных сооружений для подготовки воды из поверхностных источников, включающая отстаивание и фильтрование, не может гарантировать необходимое качество очищенной воды. Широко применяемое первичное хлорирование не обеспечивает в полной мере удаление растворенных органических элементов биогенного и антропогенного происхождения. Зачастую, образующиеся при хлорировании промежуточные органические соединения имеют еще большую токсичность [4]. С середины 70-х годов XX века все большее распространение для удаления органических примесей приобретает сорбционная очистка [4, 5, 8, 9, 18]. Главными недостатками данного метода являются значительная стоимость сорбентов и сложность их регенерации. Поэтому исследования, направленные на повышение эффективности очистки воды с помощью сорбции, а также сокращение расхода дорогостоящих сорбентов, являются актуальными. Данная проблема также является важной для сельских населенных пунктов, особенно, при чрезвычайных ситуациях, например, наводнении, когда существующие источники водоснабжения могут быть загрязнены, а система водоснабжения разрушена.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Для извлечения из воды органических примесей наибольшее применение получил активированный уголь (АУ) [3, 4]. Анализ существующих конструкций адсорберов показывает, что наиболее распространенными в практике водоочистки являются устройства с неподвижным плотным слоем сорбента [2, 4, 10, 18, 20]. В качестве фильтрующей загрузки в этом случае обычно применяют гранулированный активированный уголь [3, 4, 18]. Основными недостатками данных устройств являются:

- невозможность удаления слоя сорбента, истощившего грязеемкость, и добавления свежего сорбента без остановки процесса очистки; таким образом, вода фильтруется через слой загрузки, где практически не осуществляется удаление органических примесей, но происходит падение напора;
- то, что помимо растворенных органических примесей в толще фильтрующей загрузки также задерживаются взвешенные вещества, которые приводят к быстрой кольматации первого по направлению фильтрации слоя загрузки и, соответственно, росту потерь напора в сооружении [18];
- биообрастание гранул фильтрующей загрузки, а также их истирание при промывке [4, 18].

Первая проблема решается или секционированием пространства сорбционного фильтра, или путем последовательной очистки воды в нескольких устройствах: при этом отключается на регенерацию первый по направлению движения воды фильтр, а новый подключается в конце цепочки [12].

Проблема кольматации фильтрующей загрузки решается при применении сооружений с расширенным слоем сорбента. Взрыхление загрузки осуществляется за счет увеличения скорости исходящего потока. В этом случае возможно использование сорбента с более мелким размером

частиц, что обеспечивает лучшую кинетику сорбции [18].

Также при водоподготовке используется заимствованный из технологий химической промышленности способ сорбции в движущемся слое сорбента [11, 14]. При этом движение зерен сорбента происходит в направлении противоположном движению воды либо импульсивно под действием гравитационных сил или вибрационных колебаний, либо непрерывно в случае очистки во взвешенном слое. Преимуществом сорбции в движущемся слое сорбента является возможность эффективной очистки в условиях резкого изменения качества исходной воды или требований к очищенной воде [18]. Обеспечивается непрерывное обновление сорбента, благодаря чему поддерживается высокая разность концентраций примесей в воде и сорбенте и, соответственно, интенсивный массообмен. Недостатки способа – это сложность равномерного распределения сорбента и значительные размеры сооружения для обеспечения необходимого времени контакта из-за высокой скорости восходящего потока, удерживающего частицы сорбента во взвешенном состоянии. Применение же вместо гранул дробленного или порошкообразного активированного угля обуславливает проблему его последующего удаления.

С другой стороны, порошкообразные угли в 2-3 раза дешевле гранулированных [4]. Поэтому на станциях водоподготовки практикуют добавление к воде порошкообразного активированного угля на водозаборных сооружениях или на стадии коагулирования и удаление его на скорых фильтрах [4]. Но при этом активированный уголь безвозвратно теряется вместе с осадком, а из-за его значительных концентраций в очищаемой воде возрастает нагрузка на очистные сооружения.

В устройствах небольшой производительности проблема задержания частиц сорбента решается путем применения ультрафильтрационных мембранных элементов [13]. Но мембраны еще более чувствительны к концентрации взвеси в исходной воде [1] и, поэтому при данной схеме очистки требуются частые промывки мембранных элементов, что увеличивает эксплуатационные расходы на очистку.

Таким образом, каждый из описанных способов сорбционной очистки, имеет определенные недостатки, препятствующие их более широкому применению. Актуальным является разработка устройств, обеспечивающих необходимую степень и надежность очистки при минимальных затратах. Математическое моделирование позволяет выделить перспективные направления усовершенствования технологии сорбционной очистки и обосновать их эффективность.

Основными уравнениями, используемыми для описания процесса сорбции, являются [7, 15, 18, 19]:

- уравнение кинетики:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \beta(C - C_p); \quad (1)$$

- уравнение переноса сорбата:

$$\left(1 - \frac{b}{\rho}\right) \frac{\partial C}{\partial t} + b \frac{\partial a}{\partial t} + v \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial C}{\partial z} \right); \quad (2)$$

где a – концентрация примеси в сорбенте, мг/мг; C – концентрация примеси в очищаемой воде, мг/л; b – концентрация сорбента в воде, мг/л; C_p – равновесная концентрация примеси в воде, мг/л; t – время, с; z – вертикальная координата, м; D – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; β – коэффициент массопередачи, $\text{л}/(\text{мг}\cdot\text{с})$; v – скорость потока очищаемой воды, м/с.

Для замыкания системы уравнений (1) - (2) используют зависимость (3) между концентрацией примеси в сорбенте и равновесной концентрацией примеси в растворе (изотерму сорбции):

$$a = f(C_p). \quad (3)$$

В [16] получены строгие решения задачи статистической адсорбции при описании кинетики данного процесса, для выбора рациональных технологических параметров разработана расчетная методика. В [17] проанализировано поглотительное действие отдельного зерна адсорбента.

При моделировании сорбции в движущемся слое сорбента необходимо учитывать влияние условий подвода-отвода очищаемой воды и сорбента на его распределение в рабочей зоне аппарата, а также изменение концентрации примеси в сорбенте за счет его движения.

Учет данных факторов при математическом моделировании сорбционной очистки позволит более обосновано выделить наиболее эффективные решения.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ публикаций показывает, что сорбционная очистка воды для хозяйственно-питьевых нужд является эффективным методом, который для более широкого использования требует дальнейшего усовершенствования. Перспективным направлением представляется разработка устройств, в которых, во-первых, осуществляется интенсивная кинетика сорбции загрязняющих веществ, во-вторых, предоставляющих возможность применения более дешевых порошкообразных сорбентов, и, в-

третьих обеспечивающих удаление частиц отработанного сорбента из воды.

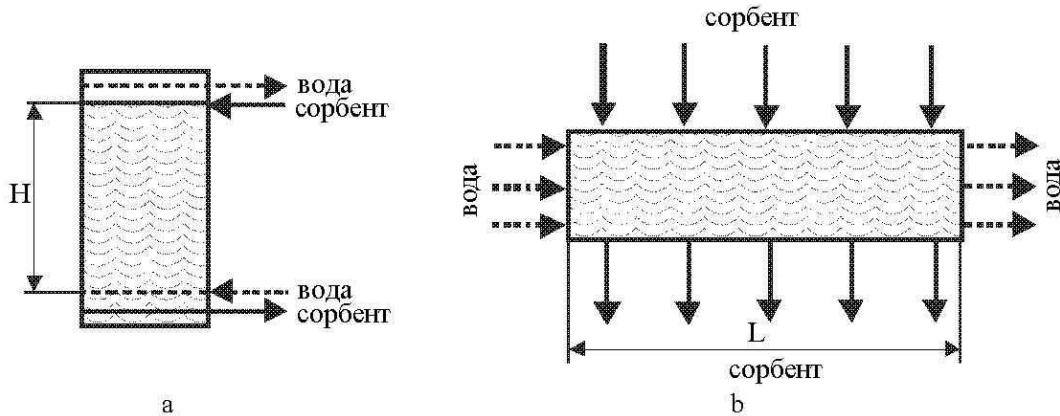


Рис. 1. Противоточная (а) и перекрестная (b) схемы очистки

Fig. 1. Countercurrent (a) and cross (b) purification scheme

Таким образом, целью исследований является теоретическое обоснование путей повышения эффективности удаления из воды органических примесей с помощью сорбционного разделения.

Для этого необходимо расширить систему основных уравнений для учета конструктивных или технологических особенностей различных схем сорбционной очистки, с помощью математического моделирования сравнить данные схемы, разработать более эффективные решения.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Для решения поставленной задачи рассмотрим две основных схемы сорбционной очистки в взвешенном движущемся слое сорбента: противоточную и перекрестную (рисунок 1).

Для описания процесса сорбционной очистки для противоточной схемы воспользуемся уравнениями (1) – (3). Для предварительного анализа упростим данные уравнения: пренебрежем диффузионным переносом, скорости движения потока воды и осаждения сорбента примем величинами постоянными, распределение сорбента равномерным, а изотерму сорбции линейной (4):

$$a = K \cdot C_p, \tag{4}$$

где K – коэффициент сорбции, л/мг.

Учтем перенос концентрации примеси в сорбенте за счет его движения добавлением к уравнению (1) слагаемого $(v - u_w) \frac{\partial a}{\partial z}$, где u_w – скорость осаждения частиц сорбента в неподвижной воде. Перейдем к безразмерным величинам:

$$\begin{aligned} \tilde{C} &= \frac{C}{C_0}; \tilde{b} = \frac{b}{C_0}; \tilde{\rho} = \frac{\rho}{C_0}; \tilde{a} = a; \tilde{v} = v \cdot \frac{S}{Q}; \tilde{u}_w = u_w \cdot \frac{S}{Q}; \\ \tilde{t} &= t \cdot \frac{Q}{S \cdot H}; \tilde{z} = \frac{z}{H}; \tilde{K} = K \cdot C_0; \tilde{\beta} = \beta \cdot C_0 \cdot \frac{Q}{S \cdot H}, \end{aligned}$$

где C_0 – концентрация примеси в исходной воде, мг/л; Q – расход очищаемой воды, м³/с; S – площадь поперечного сечения адсорбера, м²; H – высота рабочей зоны адсорбера, м.

В дальнейшем значок «~» опустим.

С учетом приведенных допущений и преобразований уравнения (1) – (2) примут вид

$$\frac{\partial a}{\partial t} + (v - u_w) \frac{\partial a}{\partial z} = \beta \left(C - \frac{a}{K} \right), \tag{5}$$

$$\left(1 - \frac{b}{\rho} \right) \frac{\partial C}{\partial t} + b \frac{\partial a}{\partial t} + v \frac{\partial C}{\partial z} = 0. \tag{6}$$

Система уравнений (5) – (6) решается численно методом конечных разностей при следующих граничных и начальных условиях:

$$\begin{aligned} t = 0 \quad C = 0; \quad a = 0, \\ z = 0 \quad C = 1; \quad z = 1 \quad a = 0. \end{aligned}$$

При перекрестной схеме, представленной на рисунке 1, организовать движение частиц сорбента перпендикулярно движению потока можно за счет силы тяжести.

Для описания процесса очистки по перекрестной схеме с учетом принятых упрощений используем следующую систему уравнений:

$$\frac{\partial a}{\partial t} + v \frac{\partial a}{\partial x} + u_w \frac{\partial a}{\partial z} = \beta \left(C - \frac{a}{K} \right), \tag{7}$$

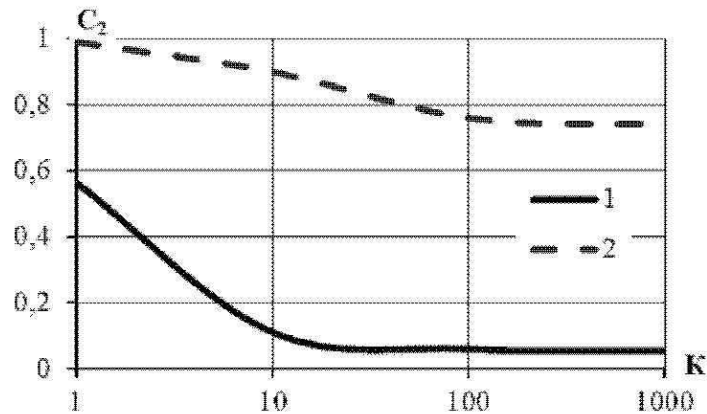


Рис. 2. Сравнение перекрестной (1) и противоточной (2) схем сорбционной очистки

Fig. 2. Comparison of cross (1) and countercurrent (2) schemes of the sorption purification

$$\left(1 - \frac{b}{\rho}\right) \frac{\partial C}{\partial t} + b \cdot \beta \left(C - \frac{a}{K}\right) + v \frac{\partial C}{\partial x} = 0. \quad (8)$$

Граничные и начальные условия:

$$\begin{aligned} t = 0 \quad C = 0; \quad a = 0, \\ x = 0 \quad C = 1; \quad z = 0 \quad a = 0. \end{aligned}$$

Переход к безразмерным величинам, которые входят в уравнения (7) и (8), осуществляется аналогично, только вместо параметра H используется параметр L – длина рабочей зоны адсорбера.

Средняя концентрация примеси на выходе из адсорбера определяется по зависимости:

$$\bar{C} = \frac{1}{H} \int_0^H C_{x=1} \cdot dz,$$

Сравнение двух схем с помощью решения уравнений (5), (6) и (7), (8) показывает преимущество перекрестной схемы для сорбентов с различной изотермой сорбции (рисунок 2). Это объясняется большими разностями концентраций примеси в воде и сорбенте по всей длине рабочей зоны адсорбера. Критерием для сравнения служит концентрация примеси в очищенной воде C_2 .

Следует также отметить, что при использовании в противоточной схеме очистки сорбента с мелкими частицами, необходимо уменьшать скорость восходящего потока, соответственно, уменьшать производительность, чтобы не было выноса сорбента вместе с очищенной водой.

Недостаток же перекрестной схемы очистки, представленной на рисунке 1, заключается в

следующем. С точки зрения экономии желательно, чтобы частицы сорбента на момент достижения дна сооружения, исчерпывали свою сорбционную способность. Для повышения эффективности при использовании сорбентов с пологой изотермой сорбции необходимо увеличение высоты сооружения. Увеличение высоты или применение более мелкого сорбента приводит к необходимости увеличения длины, т.к. частицы сносятся потоком. Сорбент с более крупными частицами оседает лучше, но имеет более пологую изотерму сорбции. Кроме того, сорбент не может быть идеально монодисперсным, поэтому часть мелких частиц выносится вместе потоком, повышая в очищенной воде концентрацию взвешенных веществ, что требует дополнительных устройств для очистки.

Решить данную проблему позволяет применение центробежных сил, создаваемых центрифугирующим устройством, схема которого представлена на рисунке 3. Данное устройство состоит из двух зон: зоны сорбционной очистки (I) и зоны удаления взвеси (II). Для повышения эффективности удаления взвеси вторая зона разделена на секции цилиндрическими вставками. В данном устройстве можно создавать центробежные силы в десятки раз превышающие силу тяжести, что дает возможность применения сравнительно дешевых порошкообразных сорбентов с размером частиц 10-50 мкм, обеспечивающих более быстрое протекание процесса.

Для описания процесса сорбционной очистки в предлагаемом устройстве используем следующую систему уравнений:

$$\frac{\partial a}{\partial t} + u_w \cdot \frac{\omega^2 \cdot r}{g} \cdot \frac{\partial a}{\partial r} + v \frac{\partial a}{\partial z} = \beta \left(C - \frac{a}{K}\right), \quad (9)$$

$$\left(1 - \frac{b}{\rho}\right) \frac{\partial C}{\partial t} + b \cdot \beta \left(C - \frac{a}{K}\right) + v \frac{\partial C}{\partial z} = 0, \quad (10)$$

где ω - угловая скорость, c^{-1} , в безразмерном виде
 $\tilde{\omega} = \omega \cdot \frac{S \cdot H}{Q}$; g - ускорение свободного падения, m/c^2 .

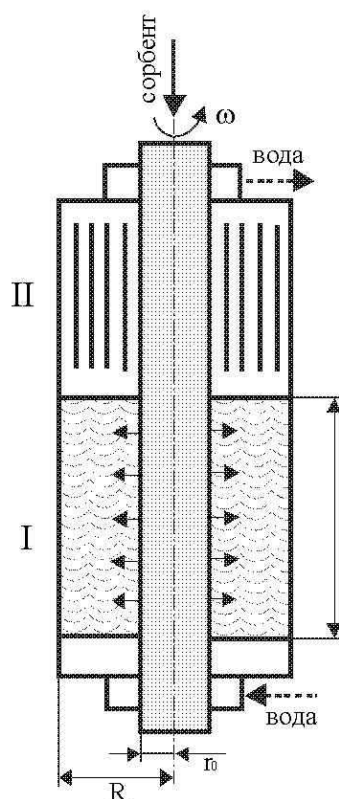


Рис. 3. Центрифугирующее устройство

Fig. 3. Centrifugation device

Также используем уравнение переноса сорбента:

$$u_w \cdot \frac{\omega^2 \cdot r}{g} \cdot \frac{\partial b}{\partial r} + v \frac{\partial b}{\partial z} = 0, \quad (11)$$

Граничные и начальные условия:

$$t = 0 \quad C = 0; \quad a = 0,$$

$$r = r_0 \quad a = 0, \quad b = b_0; \quad z = 0 \quad C = 1.$$

На рисунке 4 представлен пример расчета по уравнениям (9) – (11) изменения концентрации примеси в воде (C), а на рисунке 5 показано преимущество сорбционной очистки в центробежном поле.

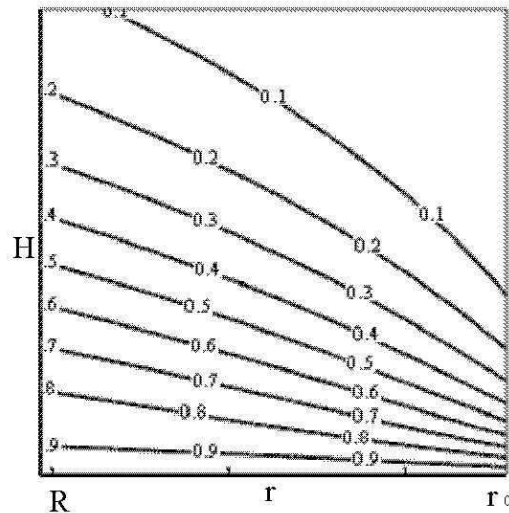


Рис. 4. Пример расчета изменения концентрации примеси в центрифугирующем устройстве

Fig. 4. Example calculation of change of the impurity concentration in the centrifugation device

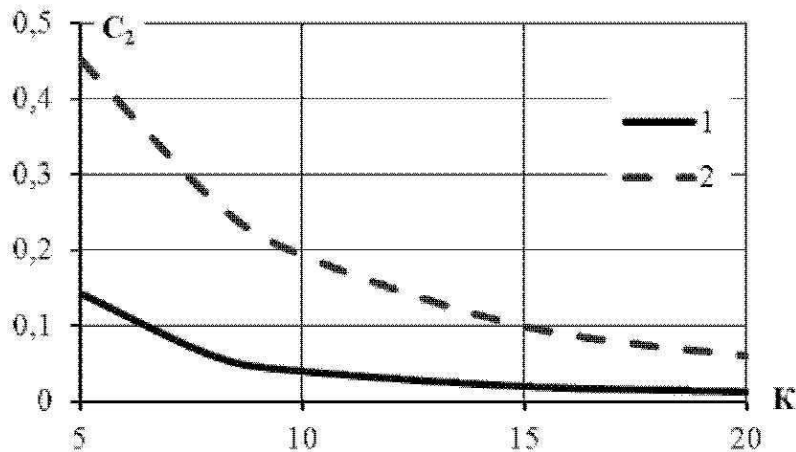


Рис. 6. Сравнение очистки в центробежном поле (1) и в поле силы тяжести (2)

Fig. 6. Comparison of purification in a centrifugal field (1) in the gravitational field (2)

С помощью уравнений (9) – (11) были проведены исследования влияния внутреннего радиуса r_0 предлагаемого центрифугирующего устройства на эффективность очистки. Пример расчета представлен на рисунке 6. Расчет показал, что функция: $C_2 \left(\frac{r_0}{R} \right)$ имеет минимальный экстремум.

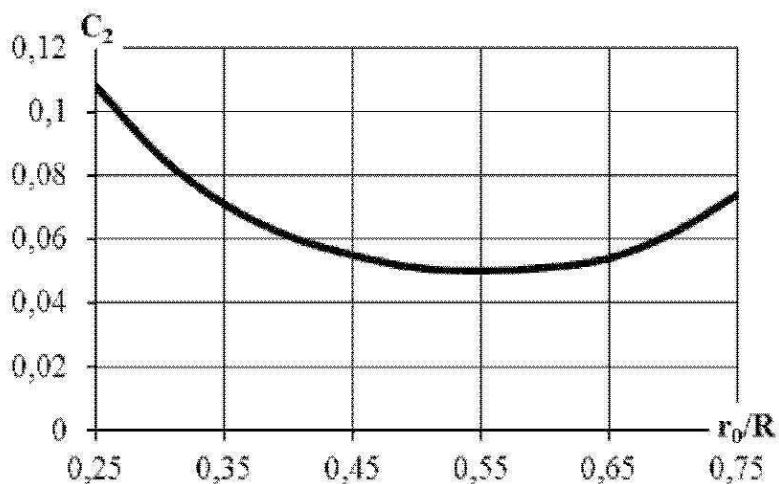
Это можно объяснить следующим образом. С увеличением r_0 сокращается площадь поперечного сечения устройства, соответственно, возрастает скорость потока и уменьшается время контакта воды и сорбента. С другой стороны, при уменьшении r_0 частичка сорбента при выходе в рабочую зону оказывается в поле невысоких значений центробежных сил, скорость осаждения в

этой области уменьшается. Время прохождения расстояния $R - r_0$ увеличивается и частичка исчерпывает свою грязеемкость еще до того, как достигает поверхности осаждения, что отрицательно сказывается на эффективности очистки.

Следует отметить, что применение центрифугирующего устройства требует дополнительных энергетических затрат. Мощность необходимую для раскручивания поступающей на очистку жидкости можно рассчитать по формуле [6]

$$N = \frac{1}{2} \rho_v \cdot Q \cdot \omega^2 \cdot (R^2 + r_0^2),$$

где ρ_v – плотность воды, кг/м^3 .

Рис. 6. Зависимость эффективности очистки от параметра r_0 Fig. 6. Dependence of the purification effectiveness on parameter r_0

Целесообразность применения центрифугирующего устройства необходимо проверять технико-экономическими расчетами, сравнивая затраты электроэнергии со стоимостью сорбента.

ВЫВОДЫ

Проведен теоретический анализ эффективности извлечения из воды органических примесей сорбцией во взвешенном слое при различных схемах очистки. С помощью математического моделирования обоснована эффективность применения для сорбционной очистки центрифугирующего устройства, центробежное поле которого ограничивает движение частиц сорбента в продольном направлении, позволяет извлечь частицы, исчерпавшие свою грязеемкость, что дает возможность применения дешевых порошкообразных сорбентов и сокращения их дозы. Представленные материалы обосновывают необходимость проведения дальнейших теоретических исследований с учетом диффузии и более сложных граничных условий, а также экспериментального подтверждения их результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. Eroyan, A. Karagiaur, S. Babenko. 2012 Researching the work of membrane ultrafiltration module / MOTROL // Motoryzacja i energetyka rolnictwa. Motorization and power industry in agriculture. – Lublin. – V. 14, № 5, 53-56.
2. Ахманов М. 2002 Вода, которую мы пьем. Качество питьевой воды и ее очистка с помощью бытовых фильтров. – СПб.: «Невский проспект». – 192.
3. Епоян С.М., Колотило В.Д., Друшляк О.Г., Сухоруков Г.И., Айрапетян Т.С. 2010 Водопостачання та очистка природних вод: Навчальний посібник – Х: Фактор, - 192.
4. Журба М.Г., Соколов Л.И., Говорова Ж.М. 2010 Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: в 3 т. Т.2. Очистка и кондиционирование природных вод. – изд. 3-е, перераб. и доп.: Учеб. пособие. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов. – 552.
5. Запольський А.К., Мішкова-Клименко Н.А., Астрелін І.М., Брик М.Г., Гвоздяк П.І., Князькова Т.В. 2000 Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод: [підручник] – К.: Лібра. – 552.
6. Карагяур А.С., Скорик А.Л. 2008 Теоретические предпосылки применения центробежных сил для осветления природной воды // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – Вип. 46. – 176-180.
7. Кельцев Н.В. 1984 Основы адсорбционной техники. – М., Химия, – 592.
8. Когановский А. М., Клименко Н.А., Левченко, Т.М., Рода И.Г. 1990 Адсорбция органических веществ из воды. – Л.: Химия– 256.
9. Куликов Н.И., Найманов А.Я., Омельченко Н.П., Чернышев В.Н. 2009 Теоретические основы очистки воды: учебное пособие. – Донецк: Ноулидж. – 298.
10. Орлов В.О., Мартинов С.Ю., Зошук А.М. 2006 Проектування станцій прояснення та знебарвлення води. Навч. посібник – Рівне: Національний університет водного господарства та природокористування. – 252.
11. Пат. 2259860 (RU), МПК B01D15/00, B01J47/02, Устройство для противоточного контактирования жидкой и зернистой фаз / Ястребов Д.А. (RU), Шаталов В.В. (RU),

- Нестеров Ю.В. (RU), Смышляев В.Ю. (RU), Горохов Д.С. (RU) - № 2004101032/15; заявл. 20.01.2004 ; опубл. 10.09.2005. – Режим доступа к патенту:
<http://www1.fips.ru/wps/portal/Registers/>
12. Пат. 2367496 (RU), МПК B01D15/00. Обработка активированным углем / Внуковский Петр (SE), Тигерфалк Роберт (SE), Йенссон Альф Томас Микаэль (SE) - № 2006115559/15; заявл. 07.10.2004 ; опубл. 20.09.2009. – Режим доступа к патенту:
<http://www1.fips.ru/wps/portal/Registers/>
13. Пат. 2375312 (RU), МПК C02F1/28, C02F1/44, C02F1/52, C02F1/72, C02F101/36. Способ очистки сырой воды, содержащей труднорастворимое вещество / Мурамото Такахиса (JP), Есиока Есиоки (JP), Моримицу Козо (JP), Матида Масаси (JP), Огоси Синго (JP), Нисии Масахиро (JP), Миязаки Ясумицу (JP), Камеду Сигеру (JP) - № 2006126635/15; заявл. 20.01.2005 ; опубл. 10.12.2009. – Режим доступа к патенту:
<http://www1.fips.ru/wps/portal/Registers/>
14. Пат. 2485993 (RU), МПК B01D15/00, B01J8/00. Новая система распределения и сбора потоков в многоступенчатой колонне, содержащая разбрызгиватель / Ожье Фредерик (FR), Дармансье Дени (FR) - № 2009124518/05; заявл. 26.06.2009 ; опубл. 27.06.2013. – Режим доступа к патенту:
<http://www1.fips.ru/wps/portal/Registers/>
15. Подольский В.П., Турбин В.С., Радченко М.Н. 2004 Математическое моделирование процессов удаления и нейтрализации жидких стоков автомобильных дорог // Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. – Воронеж: ВГУ – №. 1. – 139-141. Режим доступа к информации:
http://www.ebiblioteka.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/Voronezh/him/2004-01/him0401_25.pdf
16. Поляков В.Л. 2011 О моделировании статической адсорбции // Науково-технічний збірник: «Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки». – К.: КНУБА. – Вип. 16 – 132-141. Режим доступа к информации:
http://archive.nbuv.gov.ua/portal/natural/pvvg/2011_16/16_132_141.pdf
17. Поляков В.Л. 2012 Теоретический анализ действия зерна адсорбента // Доповіді НАН України. Серія: Механіка - № 4 – 64-69. Режим доступа к информации:
<http://archive.nbuv.gov.ua/portal/all/reports/2012-04/12-04-11.pdf>
18. Смирнов А.Д. 1982 Сорбционная очистка воды. – Л.: Химия. – 168.
19. Статкус М.А., Цизин Г.И. 2009 Математическое моделирование сорбционного концентрирования в проточных системах анализа // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. – Т 50. № – 4. - 238-244. Режим доступа к информации:
<http://archive.nbuv.gov.ua/portal/all/reports/2012-04/12-04-11.pdf>
20. Фрог Б.Н., Левченко А.П. 1996 Водоподготовка: Учебн. пособие для вузов – М.: Издательство МГУ. – 680.

THE THEORETICAL JUSTIFICATION IMPROVING SORPTION TREATMENT OF WATER

Summary. The theoretical premise efficiency of water treatment sorption in the field of centrifugal forces are presented.

Key words: sorption, transport equation, kinetic equation, centrifugation device, concentration.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СУСПЕНЗИИ В ТОНКОСЛОЙНОМ ЭЛЕМЕНТЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ

Степан Эпоян, Александр Сыроватский, Светлана Бабенко

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

Адрес: Украина, г. Харьков, ул. Сумская, 40

E-mail: s.garbuz@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, позволяющие описать движение суспензии в тонкослойном элементе усовершенствованной конструкции.

Ключевые слова: тонкослойный элемент, мелкодисперсные примеси, движение суспензии.

ВВЕДЕНИЕ

Рост требований к качеству питьевой воды, увеличение объемов сточных вод, которые направляются на очистку, недостаточная очистка поверхностно-ливневых вод усложняют проблему удаления одного из основных видов загрязнения природных и сточных вод, – нерастворимых примесей, или взвешенных веществ.

Основным методом выделения оседающих и всплывающих примесей из воды на водопроводных и канализационных станциях является отстаивание [2, 7, 8, 12, 19]. Однако, традиционные методы предварительного осветления воды, связанные с использованием отстойников, являются малоэффективными. Кроме того, они занимают значительные площади, требуют использования зачастую дорогостоящих реагентов и от эффективности их работы зависит работа последующих сооружений (фильтров, биоокислителей и др.).

В связи с этим актуальной является задача интенсификации работы подобных сооружений, которую можно решить с помощью использования тонкослойных отстойников [1, 5-7, 11]. В этих сооружениях за счет уменьшения высоты осадения примесей возможно значительно улучшить качество очищенной воды при минимальных эксплуатационных затратах.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

В зависимости от исходной воды концентрация взвешенных веществ в ней может колебаться от нескольких сотен мг/л (в основном поверхностные источники воды) до нескольких тысяч мг/л (поверхностно-ливневые и промышленные сточные воды). При этом сброс в водоемы недостаточно очищенного поверхностно-ливневого и промышленного стока является одним из основных источников ухудшения качества поверхностных вод. Поэтому их качественная очистка приводит к уменьшению нагрузки на водопроводные очистные сооружения.

Эффективность работы отстойных сооружений обусловлена концентрацией взвеси, гидравлической крупностью частиц, их гранулометрическим составом. Однако, учитывая непостоянство расхода, необходимость использования значительных площадей и дорогостоящих реагентов, а также то, что взвешенные вещества представлены мелкодисперсными частицами, то их извлечение в обычных отстойниках является недостаточно эффективным.

Использование тонкослойных отстойников позволяет сократить эффективное время отстаивания в 8-12 раз и повысить эффект задержания загрязнений до 80..90% [1, 7, 11, 18].

Тонкослойные отстойники – сооружения, в которых процесс отстаивания протекает в слое жидкости небольшой глубины (от нескольких сантиметров до нескольких десятков сантиметров). Вследствие уменьшения высоты слоя отстаиваемой жидкости в тонкослойных отстойниках сокращается продолжительность отстаивания. Это приводит к значительному увеличению производительности и уменьшению объема сооружения. Преимуществом данных отстойников является также более равномерное распределение потока, чем достигается повышение коэффициента использования их объема. [10, 13, 20].

Известны конструкции трубчатых и полочных тонкослойных отстойников непрерывного и циклического действия. В зависимости от направления движения отстаиваемой жидкости существуют прямоточные, противоточные, поперечные и комбинированные тонкослойные отстойники. В прямоточных - направление движения отстаиваемой жидкости совпадает с направлением выпадения осадка, в противоточных – жидкость движется в противоположном направлении. В поперечных – движение жидкости горизонтально, а тонкослойные элементы расположены под углом к горизонтальной плоскости [10].

Рассмотрим детальнее каждый из видов тонкослойных отстойников.

Отстойники циклического действия характеризуются небольшим наклоном секций (15° –

30°); накапливающийся в них осадок удаляется как, правило, промывкой обратным током осветленной жидкости. Эффективность работы таких отстойников значительно выше других конструкций тонкослойных модулей за счет небольшой высоты осаждения взвеси. Однако, вследствие интенсивного накопления осадка внутри секций, область использования данных отстойников несколько сужается. Поэтому их применяют для осветления вод от оседающих примесей, когда их концентрации имеют невысокие значения.

Отстойники непрерывного действия, работающие по прямоточной схеме, лучше всего использовать при очистке жидкостей, загрязненных преимущественно всплывающими примесями (например, нефтепродуктами) и сравнительно небольшим количеством тяжелых оседающих частиц. Угол наклона полок принимается от 35° до 50°, расстояние между ними 25-100мм. В таких отстойниках создаются благоприятные условия для удаления из них осадка, так как поток жидкости, совпадая с направлением сползания осадка, способствует его движению.

В отстойниках, работающих по противоточной схеме, угол наклона полок уже больше – 45°-60°, расстояние между полками также может увеличиваться из-за повышения вероятности заполнения осадком межполочного пространства. Поэтому данный тип тонкослойных отстойников целесообразно применять для очистки вод, в загрязнении которых преобладают оседающие грубодисперсные примеси невысокой концентрации и гидравлической крупности.

В отстойниках с поперечным наклоном секций, как правило, входное сечение перпендикулярно направлению движения потока, а сползание выпавшего осадка обеспечивается за счет наклона полок к горизонту под углом, принимаемым от 45° до 60°. Данные отстойники являются универсальными и пригодны для выделения как всплывающих, так и оседающих примесей.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной работе внимание уделено взвешенным крупно- и мелкодисперсным примесям, поэтому в дальнейшем рассматривается противоточная схема движения загрязненной воды и осадка, как наиболее подходящая для выделения такого вида загрязнений [16].

Большое влияние на эффект очистки в тонкослойном отстойнике оказывают конструктивные и технологические параметры осветляющего устройства. Под конструктивными параметрами подразумеваются размеры тонкослойного элемента: длина и высота, угол

наклона элемента к горизонтали и условия подвода и отвода осветляемой воды. Под технологическими – пропускная способность элемента, гидравлическая крупность, концентрация загрязнений, скорость движения исходной воды.

Целью данной работы является проведение комплекса теоретических и экспериментальных исследований, направленных на создание таких конструктивных и технологических параметров тонкослойного элемента, при которых эффект очистки был бы максимальным при минимальных эксплуатационных затратах.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Описание движения суспензии по наклонной поверхности является достаточно сложной задачей, т.к. зависит от многих параметров. В последнее время все больше появилось способов численного моделирования движения различных материалов по наклонной поверхности, однако они являются или достаточно сложными, или учитывают не все факторы, влияющие как на движущуюся загрязненную воду, так и на сползающий осадок [14].

Как известно, эффект очистки воды зависит от высоты слоя отстаивания, которая, в свою очередь, зависит от угла наклона, поэтому чем меньше будет высота, тем выше должен быть эффект [20]. Однако, проведенные нами эксперименты показывают, что это не совсем соответствует действительности, в особенности при малых углах наклона осветляющего элемента.

Экспериментальные исследования проводили на лабораторной установке, представленной на рис. 1.

Эта установка состоит из центральной колонны (7), к которой присоединен трубчатый тонкослойный элемент (12). Он выполнен в виде стеклянной трубки диаметром $D = 40$ мм и длиной $L = 1.1$ м. Угол наклона стеклянной трубки меняли с помощью опорной стойки (9) и подвижного тройника (10).

Принцип работы лабораторной установки следующий: исходная загрязненная вода подается в установку из бака (1). Из него с помощью погружного насоса (2) вода по шлангу (3) под напором попадает в центральную колонну (7), при этом клапан (4) находится в открытом положении, а клапан (5) на шланге (6) – в закрытом. Шланг (6) служит для опорожнения установки. Для циркуляции воды предусмотрен перелив (8). Для сбора осадка в осветляющем элементе предназначено устройство (11).

Сбор очищенной воды (16) производится в мерном баке (14), который имеет перелив (15).

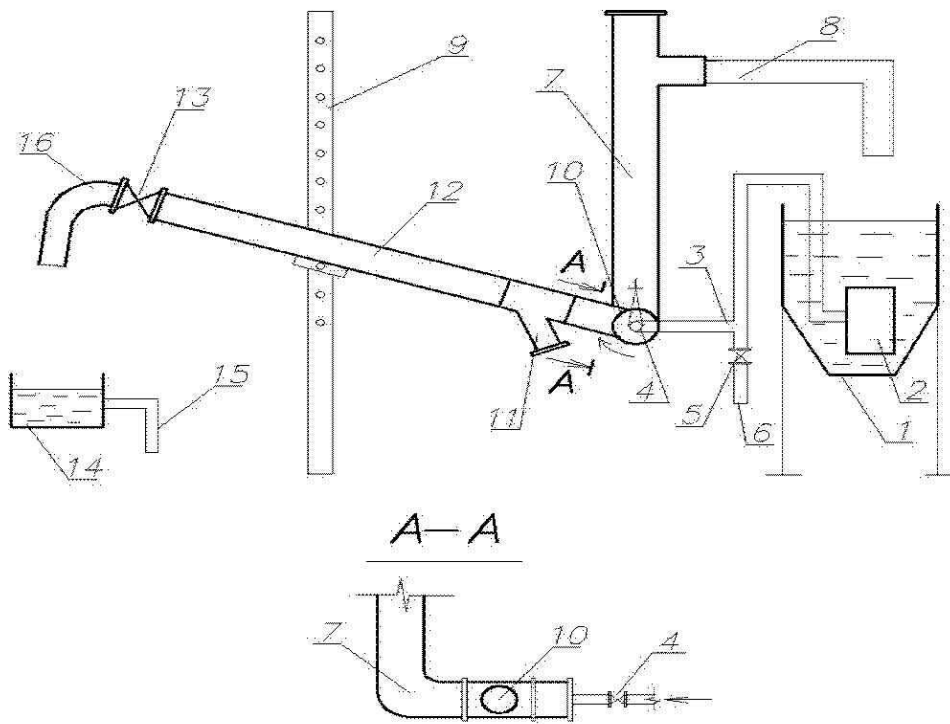


Рис. 1. Схема лабораторной установки
Fig. 3. Scheme of the experimental setup

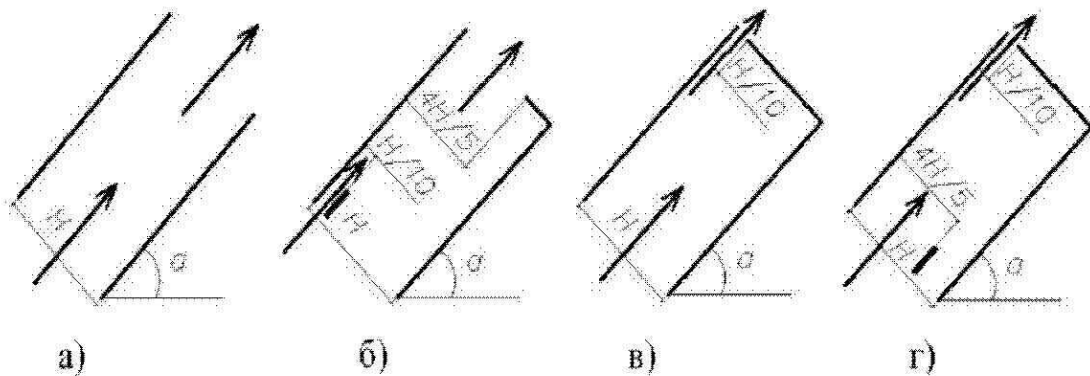


Рис. 2. Варианты различных условий подвода и отвода воды
Fig. 2. Variants of different conditions of water supply and discharge

Как показано выше, при малых углах наклона тонкослойного элемента эффект очистки, который получали при испытании лабораторной установки, оказывался меньше, чем теоретический эффект. Данное явление мы можем объяснить наличием выноса уже осевших частиц из рабочего пространства тонкослойного элемента. Для предотвращения этого явления нами были исследованы различные конструктивные условия подвода и отвода осветляемой воды с помощью численного моделирования. Некоторые из них представлены на рис. 2.

Рассмотрим следующие варианты условий подвода и отвода воды:

- когда исходная вода как подводится, так и отводится по всей высоте межполочного пространства (вариант а);

- когда на входе в тонкослойный элемент установлена перегородка, образующая щель, высотой, равной $1/10$ всей высоты межполочного пространства, а на выходе – перегородка, образующая щель, равную $4/5$ от высоты межполочного пространства (вариант б);

- когда вода подводится по всей высоте межполочного пространства, а отвод происходит через щель, равную 1/10 высоты межполочного пространства (вариант в);

- когда подвод исходной воды происходит через щель, высотой, равной 4/5 от высоты межполочного пространства, а на выходе установлена перегородка, образующая щель, равной 1/10 от высоты межполочного пространства, через которую отводится осветленная вода.

Для решения поставленной задачи движение вязкой жидкости описали с помощью системы двумерных уравнений переноса импульса (1)-(2) и уравнения неразрывности потока (3) [3]:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + w \frac{\partial v}{\partial z} = P_x + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + v \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = P_z + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

где t – время,

x, z – координаты,

v, w – продольная и поперечная проекции скорости,

P_x, P_z – проекции суммы массовых сил и сил давления,

ν – коэффициент кинематической вязкости,

α – угол наклона тонкослойного элемента к горизонту.

Траекторию осаждения частиц находили из уравнения:

$$\frac{\partial x}{v - u \sin \alpha} = \frac{\partial z}{w + u \cos \alpha}, \quad (4)$$

где u – расчетная гидравлическая крупность,

α – угол наклона элемента к горизонту (рис. 3).

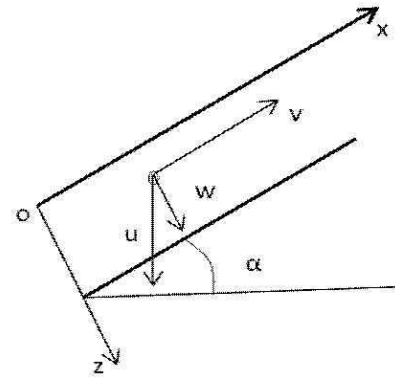


Рис. 3. Схема тонкослойного элемента
Fig. 3. Scheme of a thin-layer

В результате решения уравнений (1-4) численным способом с помощью продольно-поперечной прогонки, сделан вывод, что целесообразнее использовать схему (г), в которой подвод воды осуществлялся не по всей высоте межполочного пространства, а через щель, равную 4/5 от высоты межполочного пространства, чтобы исключить смыв заранее осевшего осадка, и, соответственно, увеличить отстойную зону.

Это предположение было подтверждено экспериментально и, в результате, конструкция осветляющего элемента была усовершенствована путем установки перегородок, образующих щели, через которые соответственно, подавалась и отводилась вода (рис. 2) [9, 15].

Также, как показали проведенные экспериментальные исследования [9], при увеличении производительности осветляющего устройства и, следовательно, скорости движения очищаемой жидкости, наблюдается вынос осевших на поверхности осаждения взвешенных частичек, особенно при малых углах наклона элемента, что отрицательно сказывается на эффекте осветления.

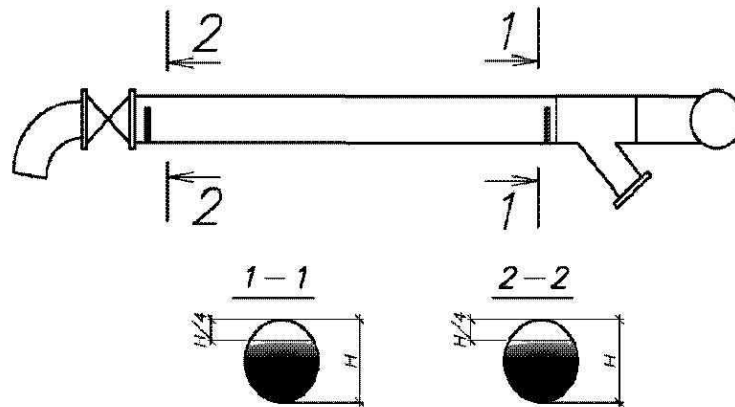


Рис. 4. Схема перегородок в тонкослойном элементе
Fig. 4. Location scheme of baffles in the thin layer element

Таким образом, возникла необходимость во внесении таких конструктивных изменений в осветляющее устройство, при которых возможный вынос загрязнений был бы сведен к минимуму.

Поэтому, был проведен ряд теоретических и экспериментальных исследований, направленных на изучение распределения осадка вод, содержащих мелкодисперсную взвесь, по поверхности осаждения.

Эти исследования [21] показали, что большая часть загрязнений выпадает в первой трети-четверти тонкослойного элемента. Здесь происходит наиболее интенсивное выпадение содержащейся в воде взвеси, в том числе наиболее крупных и тяжелых фракций, поэтому на этом участке происходит большее накопление осадка.

Кроме того, были получены зависимости для определения концентрации взвешенных частиц в воде, прошедшей очистку в усовершенствованном устройстве:

$$C_2 = C_1 \cdot [1 - \mathcal{E}_1(u_1)] \cdot [1 - \mathcal{E}_2(u_2)], \quad (5)$$

где C_1 – концентрация взвешенных веществ после первой ступени очистки, мг/л;

C_2 – концентрация взвешенных веществ после второй ступени очистки, мг/л;

\mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 – эффект очистки соответственно после первой и второй ступеней очистки;

u_1 и u_2 – гидравлическая крупность соответственно после первой и второй ступеней очистки, мм/с.

Учитывая вышеизложенное, для повышения эффективности осаждения взвеси в тонком слое было решено усовершенствовать

конструкцию тонкослойного элемента путем его разделения на две ступени. При этом, первая ступень должна иметь больший угол наклона к горизонту ($\alpha = 35^\circ - 60^\circ$), что будет способствовать беспрепятственному отведению основной массы выпавшего осадка. Угол наклона к горизонту второй ступени β должен составлять до 30° и обеспечивать нормальные условия осаждения наиболее мелкой взвеси.

Для проверки данной гипотезы был проведен комплекс экспериментальных исследований на лабораторной установке усовершенствованной конструкции (рис. 3) [17]. Установка также состоит из центральной колонны, но к которой присоединен трубчатый тонкослойный элемент, состоящий из двух ступеней очистки с разными углами наклона к горизонту (α и β).

Диаметры трубок элемента первой и второй ступени очистки одинаковы и равны 40 мм, длина первой ступени составляет 0,48 м, длина второй – 1,1 м.

Эксперименты проводили на искусственно замутненной воде, в качестве замутнителя которой использовали красную глину. Концентрацию взвешенных веществ в воде определяли оптическим методом с помощью фотоэлектроколориметра.

При проведении экспериментов изменяли скорость движения осветляемой воды (в диапазоне 1-8 мм/с), а также углы наклона первой и второй ступени очистки. Угол наклона первой ступени очистки варьировали в пределах $30^\circ - 55^\circ$, второй – в пределах $10^\circ - 35^\circ$.

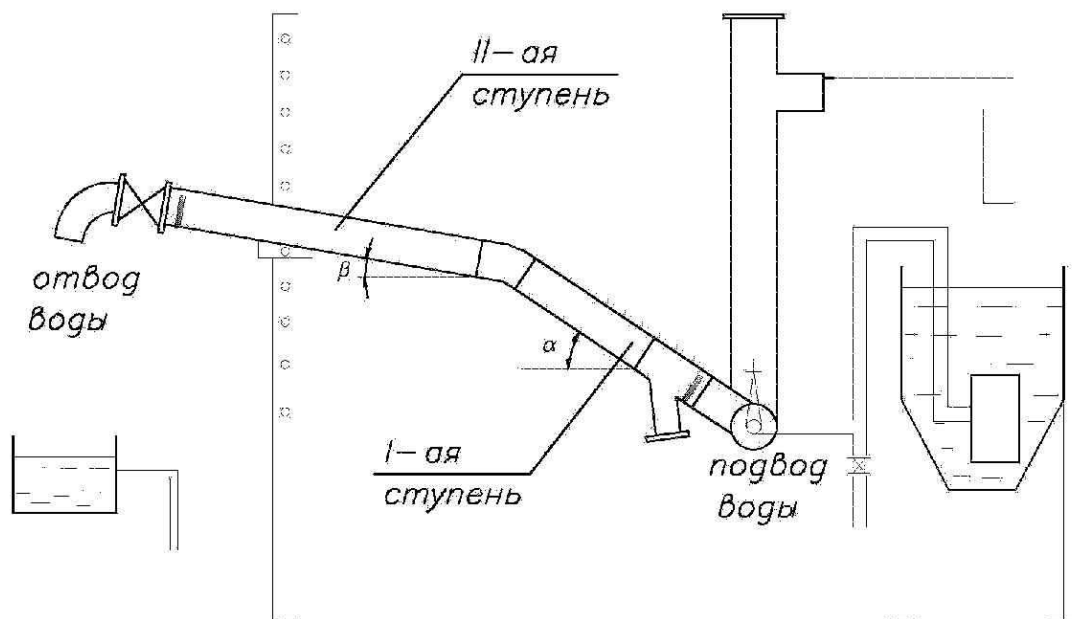


Рис.3. Схема усовершенствованной экспериментальной установки
Fig. 3. Scheme of the advanced experimental setup

Концентрация взвешенных веществ в исходной воде колебалась от 200 до 800 мг/л.

Экспериментальное значение эффекта осветления находили по концентрации взвешенных веществ на входе и выходе из тонкослойного элемента. Теоретическое значение эффекта осветления определяли по формуле:

$$\mathcal{E}_{теор} = \frac{1}{1 + a_1 \cdot u^{a_2}} \quad (6)$$

где u – гидравлическая крупность взвешенных частиц, мм/с;

a_1 и a_2 – эмпирические коэффициенты, определяемые по кривым кинетики осаждения взвеси в ходе экспериментов.

На первой ступени происходило наиболее интенсивное выделение грубодисперсной взвеси и, соответственно, накопление осадка, а угол наклона способствовал беспрепятственному его отведению. На второй ступени очистки за счет уменьшения угла и увеличения длины элемента создаются оптимальные условия для выделения тонкодисперсной взвеси. [4, 17].

Проведенные исследования на усовершенствованной лабораторной установке показали целесообразность использования предложенной конструкции тонкослойного элемента для очистки вод (рис. 5). Эффект осаждения в этом случае удалось повысить на 10-15% (при безреагентной обработке воды) по сравнению с эффектом, полученным при испытании тонкослойного элемента начальной конструкции (рис. 1).

Помимо исследований, направленных на изучение движения суспензии в тонкослойном элементе, велись также наблюдения за движением выпавшего осадка.

Изучив влияние каждой из сил, действующих на частичку взвеси, осевшую на поверхности осаждения, на процесс отрыва частицы от поверхности тонкослойного элемента, нами было установлено, что существенное влияние на отрыв частички взвеси от поверхности тонкослойного элемента оказывает величина силы тяжести. Она, в свою очередь, в основном зависит от угла наклона элемента. В результате расчетов нами обоснован угол наклона элемента в пределах 50° - 60° [23].

В литературных данных упоминается о скачкообразном (или лавинообразном) процессе сползания образующегося осадка по поверхности тонкослойного элемента. То есть осадок сползает периодически при достижении им определенного объема (массы). Для подтверждения данного мнения проводили как визуальные, так и экспериментальные наблюдения. Однако, было установлено, что такой скачкообразный процесс происходит при маленьких углах наклона тонкослойного элемента, а также на начальном этапе отстаивания при больших углах. При высоких углах с течением времени процесс в основном имеет установившийся характер.

На процесс сползания осадка по поверхности тонкослойного элемента влияют следующие факторы:

- скорость движения осветляемой суспензии

(v);

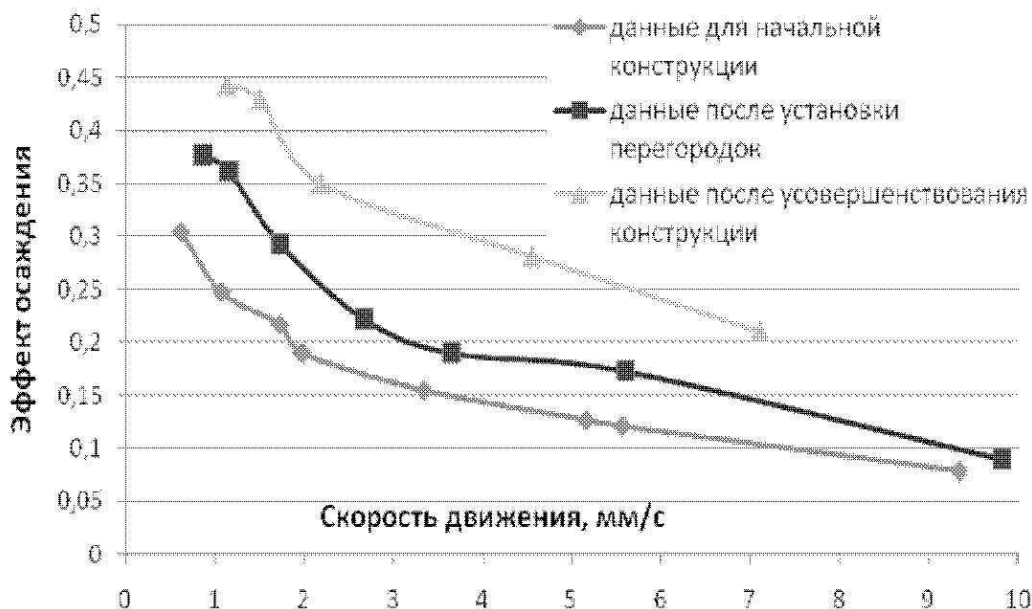


Рис. 5. Зависимость эффекта осаждения взвеси от скорости движения осветляемой воды
Fig. 3. Dependence of the slurry sedimentation effect on the motion speed of water

- угол наклона тонкослойного элемента к горизонтали (α);

- концентрация взвешенных веществ в осветляемой воде (исходная мутность, $C_{исх}$).

Экспериментальные исследования, проведенные в [22] подтвердили вышеизложенные теоретические данные. Поэтому, угол наклона первой ступени усовершенствованной конструкции тонкослойного элемента должен быть не в пределах $45-60^{\circ}$, как упоминалось выше, а в пределах $50-60^{\circ}$.

ВЫВОДЫ

Таким образом, приведенные математические зависимости позволяют описать движение суспензии в тонкослойном элементе усовершенствованной конструкции, рассчитать эффективность удаления взвешенных веществ и подобрать рациональные значения его конструктивных параметров.

ЛИТЕРАТУРА

- Абитаев М.Т., Евсеева Л.А., Евсеева О.Я., 1983. Очистка природных и сточных вод в больших городах с применением тонкослойных отстойников. Проблемы больших городов: [обзорная информация]. – М.: МГЦНТИ. – Вып. 7. – 29.
- Арцимович П.М., Казарян В.А., 1981. Качественный состав поверхностного стока с селитебных территорий крупных городов. Матер. семин. «Очистка и использование поверхностного стока с территорий городов и промплощадок». – М.: МДНТП. – 42–45.
- Бабенко С.П., Карагяур А.С., Сыроватский А.А., 2013. Тонкошаровый элемент. Пат. України № 102157, опубл. 10.06.2013, Бюл. №11.
- Бабенко С.П., 2011. Модель осаждения взвешенных веществ в тонком слое. Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – Вып. 63. – 485-489.
- Гоухберг М.С., Медведев Г.П., Алексеев М.И., 1997. Проблемы отведения и очистки поверхностного стока в Санкт-Петербурге. Водоснабжение и санитарная техника. – №1. – 20–21.
- Дегремон. Технический справочник по обработке воды. в 2-х т. Т.1: пер. с фр. – СПб.: Новый журнал, 2007. – 816.
- Дикаревский В.С., Курганов А.М., Нечаев А.П., Алексеев М.И., 1990. Отведение и очистка поверхностных сточных вод: [учеб. пособие для вузов] – Л.: Стройиздат. – 224.
- Казарян В.А., Залетова Н.А., Арцимович П.М., 1980. Очистка поверхностного стока с территории больших городов. Проблемы больших городов: [обзорная информация]. – М.: ГОСИНТИ. – Вып. 20. – 29.
- Карагяур А.С., Сыроватский А.А., Бабенко С.П., 2011. Тонкослойный отстойник с усовершенствованными устройствами подвода - отвода воды. Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – Вып. 65. – 349-353.
- Кедров Ю. В., 1974. Исследование особенностей гравитационного выделения грубодиспергированных примесей в тонком слое. Автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук.- М.- 31.
- Лихачев Н.И., Ларин И.И., Хаскин С.А. и др., 1981. Канализация населенных мест и промышленных предприятий]; под общ. ред. В. Н. Самохина. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Стройиздат. – 639.
- Молоков М.В., Шифрин В.Н., 1977. Очистка поверхностного стока с территорий городов и промышленных площадок. – М.: Стройиздат. – 104.
- Непаридзе Р. Ш., Разумовский Р.С., Исаева Н.В., 1981. Результаты эксплуатационных испытаний установок заводского изготовления для очистки сточных вод с применением тонкослойных модулей. Технологические процессы и конструкции сооружений для очистки городских сточных вод: науч. труды АКХ. – М. – вып. 118. – 35–40.
- Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч. II. СПб.: НПО «Профессионал», 2006. – 916.
- Сыроватский А.А., Бабенко С.П., Бойко О.А., Халина Д.А., 2011. Совершенствование конструкций элементов тонкослойных отстойников. Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – Вып. 66. – 346-350.
- Сыроватский А.А., Гарбуз С.П., 2010. Совершенствование схемы очистки поверхностно-ливневого стока с использованием тонкослойных отстойников. Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА. – Вып. 57 – 407-410.
- Сыроватский А.А., Бабенко С.П., 2012. Усовершенствованная конструкция тонкослойного элемента. Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ. – Вып. 67. – 246-250.
- Тугай А. М. Водоснабжение. Курсовое проектирование : [учеб. пособие для вузов] / А. М. Тугай, В. Е. Терновцев. – Киев : Вища школа. Головное изд-во, 1980. – 208.
- Тугай А.М., Орлов В.О., 2009. Водопостачання: [підручник] – К.: Знання. – 735.
- Шпаковский Э.П., 1975: Исследование процессов седиментации грубодисперсных примесей в тонкослойных отстойниках: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – М., 1975. – 26.

21. Эпоян С.М., Карагяур А.С., Сыроватский А.А., Бабенко С.П., Паболкова Е.В., 2011. Распределение осадка по поверхности осаждения в сооружениях для осветления воды отстойного типа. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса: ОДАБА. – Вип. 42. – 314-320.
22. Эпоян С.М., Сыроватский А.А., Бабенко С.П. 2013. Оценка факторов, влияющих на процесс сползания осадка в тонкослойном элементе. Сучасні проблеми охорони довкілля та раціонального використання ресурсів у водному господарстві: Матер. практ. конф., 22-26 квітня 2013 р. м. Миргород. – К.: Товариство «Знання» України. – 38-40.
23. Эпоян С., Сыроватский А., Карагяур А., Бабенко С., 2012. Повышение эффективности

работы тонкослойного отстойника. MOTROL. — Commission of motorization and energetics in agriculture. — Lublin - Rzeszów. — Vol. 14, № 6. — 247—250.

MODELING THE MOVEMENT OF SUSPENSION IN THE THIN LAYER ELEMENT OF IMPROVED DESIGN

Summary. The results of theoretical and experimental studies that allow to describe the movement of the suspension in thin layer element of improved design are presented in the article.

Key words: thin-layer settler, fine dispersed solids, movement of the suspension

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УТИЛИЗАЦИОННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ОРГАНИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Андрей Редько, Александр Редько, Артём Компан, Сергей Павловский

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

Адрес: Украина, г. Харьков, ул. Сумская 40

E-mail: andrey.ua-mail@mail.ru

Аннотация. Исследуются процессы преобразования низкопотенциальной теплоты в электроэнергию в утилизационных установках с органическими рабочими веществами. Показано влияние теплофизических свойств теплоносителей на эффективность процесса преобразования и параметры установки. Приведены регрессионные уравнения для расчёта мощности установки в зависимости от влияющих параметров.

Ключевые слова: утилизационная энергетическая установка, рабочее вещество, электрическая мощность, эффективность цикла.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений использования теплоты уходящих газов топливоиспользующих технологических агрегатов (промышленные печи металлургического производства, стекловаренные печи, компрессорные станции магистральных газопроводов, котельные установки и т.д.) является генерация электроэнергии.

Температурный диапазон удаляемых газов изменяется от 120 до 350 °С. Для всего температурного диапазона удаляемых продуктов сгорания отсутствует универсальная тепловая схема энергетической паросиловой установки и не определены эффективные рабочие теплоносители [1–3,19].

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДОВ

В связи с широким использованием и развитием геотермальной энергетики за границей получили распространение энергетические установки, которые реализуют цикл Ренкина с органическим рабочим теплоносителем (The Organic Rankine Cycle – ORC) [1-20]. Известные утилизационные энергетические установки на КС магистральных газопроводов США, а также компрессорные станции на базе ГТУ Rolls-Royce RB211 с теплоутилизационными паротурбинными установками фирмы Ormat-Energy Converter. Силовой контур установки работает по циклу Ренкина с органическим теплоносителем н-пентаном ($n-C_5H_{12}$) [13]. ГТУ Rolls-Royce RB211 мощностью 28 МВт обеспечивает производство дополнительно 6,5 МВт электрической мощности. На собственные нужды установки (насосы, вентиляторы и др.) необходимо 0,8 МВт мощности, остаток 5,7 МВт может быть передан во внешнюю сеть или использован на нужды компрессорной станции. Подобные исследования проводятся в Украине [3–20].

Сегодня для РАО «Газпром» изготавливают пароводяные турбоустановки типа К-6-1,6 мощностью 4–12 МВт.

В ОАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе» создано газотурбинную установку мощностью 4 МВт с замкнутым контуром и рабочим телом н-пентаном [14].

Однако данные об эффективности циклов в профессиональной литературе не приводятся или они являются противоречивыми [4,15,16].

Известно об исследовании органических веществ – н-пентана [4] и – н-гексана [14,16], бензола. Другие вещества практически не исследованы. Расчёты ограничены температурами греющего теплоносителя (менее 200 °С), циклы установок более высоких температур также практически не исследованы. Расчётные данные в профессиональной литературе очень разнятся, их тяжело сравнивать из-за отсутствия подробной информации.

В известных работах [1,2] исследовались различные рабочие вещества (вода и водоаммиачные смеси, диоксид углерода, фреоны). В [3–7] приводятся результаты исследований процессов преобразования теплоты в энергетических установках с органическими веществами. Появление искусственно синтезированных озонобезопасных хладонов, не содержащих хлор и бром открывает определённые перспективы. Исследования [3,16] указывают на перспективность использования смесей органических веществ и, особенно, при сверхкритических параметрах. При этом эффективным являются двухступенчатые и каскадные циклы энергетических установок, трансформирующих теплоту, как в теплонасосных агрегатах, так и в паросиловых установках.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчёты выполнялись при следующих допущениях: перепад температур между продуктами сгорания и рабочим веществом $dt_{\min} = 3; 5$ °С КПД турбины – 0,7 - 0,8; КПД насоса 0,75 - 0,8; процесс расширения пара в турбине завершается в однофазной области; конденсация пара после турбины происходит в воздушном

конденсаторе; температура атмосферного воздуха $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($288,15\text{ K}$).

На рис. 1 показана технологическая схема утилизационной энергетической установки. I контур включает теплообменник, насос 5, систему циркуляции рабочей жидкости, подключеную к испарителю и регенеративному теплообменнику 3, 3а; II контур - включает турбину с генератором, испаритель, насос, воздушный конденсатор и регенеративный теплообменник. В I и II контуре циркулирует одно и то же рабочее вещество.

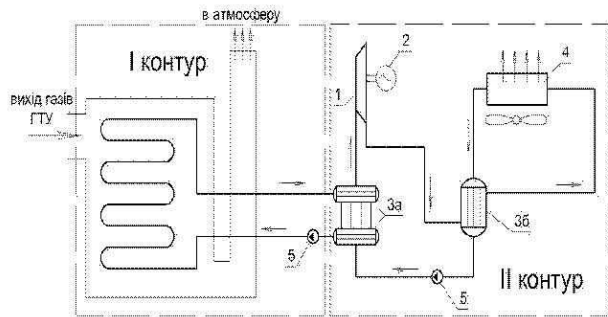


Рис.1 Технологическая схема утилизационной энергетической установки (1 – турбина, 2 – электрогенератор, 3а,3б – испаритель, регенеративные теплообменники, 4 – конденсатор, 5 – насос).

Fig. 1 Technological scheme of utilizing energy plants (1 – turbine, 2 – electrical generator, 3а,3б – vaporizer, regenerative heat-exchanger, 4 – condenser, 5 – pump)

Циклы энергетической установки показаны на рис.2.

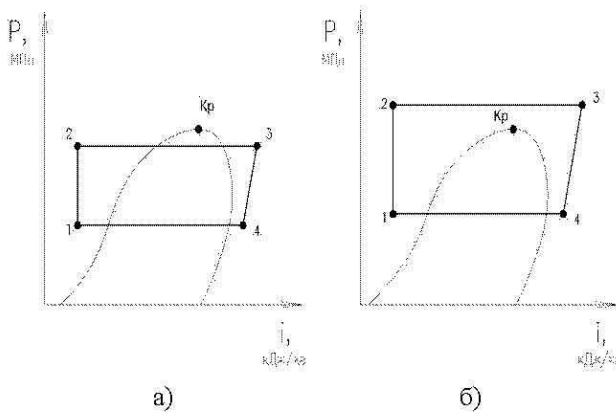


Рис.2 Циклы утилизационной установки (а – докритический, б – сверхкритический)

Fig. 2 Cycle of utilizing plant (а – subcritical, б – supercritical)

В табл.1 приведены характеристики исследуемых рабочих веществ.

Table 1. Physical and properties of working medium

Вещество	$t_{кр}, ^{\circ}\text{C}$	$P_{кр}, \text{МПа}$	$t_{н.к.}, ^{\circ}\text{C}$	$t_{верт}, ^{\circ}\text{C}$	Пределы возгорания	
					нижний	верхний
пропан (C_3H_8)	96,67	4,25	-42,07	466	2,1	9,5
н-бутан (C_4H_{10})	152,93	3,60	-0,5	431	1,5	8,5
i-бутан (C_4H_{10})	134,0	3,70	-12,55	431	1,8	8,4
н-пентан (C_5H_{12})	196,65	3,37	36,0	284	1,47	7,8
н-гексан (C_6H_{14})	234,15	3,05	69,0	261	1,24	7,5
н-гептан (C_7H_{16})	267,15	2,68	98,43	240	1,07	6,7
н-октан (C_8H_{18})	296,0	2,49	126,0	210	0,94	3,2
н-декан ($\text{C}_{10}\text{H}_{22}$)	344,65	2,096	174,1	208	0,60	5,5
этан (C_2H_6)	32,68	4,88	-89,63	472	3,07	15,0
аммиак (R717)	132,25	11,15	-33,35	650	15,0	28,0
водяной пар (H_2O)	374,15	21,77	100	-	-	-

В качестве рабочих теплоносителей изучались рабочие вещества: R600, R600a, R601a, R602, R13b, R134a, R142b, R143a, R404a, R407a, R410a, R503b, R600a/R161, R600a/141, R600a/R601, $\text{NH}_3/\text{R170}$ и другие органические вещества и их смеси.

В таблицах 2 и 3 приведены некоторые численные результаты.

Таблица 2. Значение вырабатываемой полезной мощности паровой турбины с различными рабочими веществами ($t_1=200^{\circ}\text{C}$; $m_{yx}=27\text{ кг/с}$).

Table 2. Value of generated useful power of steam turbine with different medium substances ($t_1=200\text{ }^{\circ}\text{C}$; $m_{ou}=27\text{ кг/с}$)

Рабочее вещество	$P_t, \text{кПа}$	$m, \text{кг/с}$	$N, \text{кВт}$	$\text{COP}, \%$	$\eta_{ут}, \%$
$\text{NH}_3(\Delta t=5^{\circ}\text{C})$	9500	2,87	641,7	13,9	38,3
$\text{NH}_3(\Delta t=3^{\circ}\text{C})$	9500	2,93	660,7	14,2	39,5
$\text{NH}_3/\text{C}_2\text{H}_6(60/40)$	4000	3,36	424,9	8,4	43,2
$\text{NH}_3/(60/40)$	8000	3,37	593,1	12,7	40,9
i- $\text{C}_4\text{H}_{10}/\text{н-}\text{C}_6\text{H}_{14}$	3850	5,24	456,8	13,8	29,6
i- $\text{C}_4\text{H}_{10}/\text{R161}(60/40)$	3600	7,50	615,1	12,2	42,5
i- $\text{C}_4\text{H}_{10}/\text{R141в}(60/40)$	2500	6,85	548,8	12,2	38,6

Таблица 1. Физико-химические свойства рабочих веществ

i-C ₄ H ₁₀ / н-C ₆ H ₁₄ (60/40)	3850	5,24	456,8	13,8	29,6
i-C ₄ H ₁₀ /R141в	3700	7,72	666,5	13,7	41,7
изобутан/ изопентан(90/10)		6,72	624,1	13,2	39,5

Таблица 3. Теплотехнические параметры когенерационной энергетической установки ($t_{\text{вх}}=350^{\circ}\text{C}$)

Рабочее вещество	$P_{\text{кр}}$, кПа	$P_{\text{т}}$, кПа	$t_{\text{кр}}$, $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{т}}$, $^{\circ}\text{C}$	N , кВт/(кг/с)	$\eta_{\text{ц}}$, %
гептан (C ₇ H ₁₆)	2680	4000	266,8	347	106,5	18,4
октан (C ₈ H ₁₈)	2460	4000	296,0	347	109	18,9
декан (C ₁₀ H ₂₂)	2130	4000	345,2	347	114,7	19,4
водяной пар (H ₂ O)	21800	4000	374,0	347	17,8	10,4
н-бутан (C ₄ H ₁₀)	3600	3500	153,0	347	58,9	13,1
i-пентан (i-C ₅ H ₁₂)	3300	3200	197,2	347	60,8	14,4

где $P_{\text{кр}}$, $P_{\text{т}}$ – соответственно критическое давление вещества и пара перед турбиной; $t_{\text{кр}}$, $t_{\text{т}}$ – соответственно критическая температура и пара перед турбиной; N – удельная электрическая мощность, вырабатываемая турбиной; $\eta_{\text{ц}}$ – КПД цикла.

Heat-engineering parameters of cogeneration plant ($t_{\text{ou}}=350^{\circ}\text{C}$) $P_{\text{кр}}$, $P_{\text{т}}$ – critical pressure of substance and steam at the inlet at turbine; $t_{\text{кр}}$, $t_{\text{т}}$ – critical temperature of substance and steam at the inlet at turbine; N – specific power generated by turbine; $\eta_{\text{ц}}$ – efficiency of cycle

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Как показывают результаты расчетов, вырабатываемая удельная электрическая мощность в сверхкритических циклах с органическими веществами выше, чем в циклах с водяным паром в несколько раз.

В результате исследования и оптимизации циклов со многими рабочими веществами как в докритическом, так и в сверхкритическом цикле в одноступенчатой энергетической установке было установлено, что максимальная выработка электроэнергии обеспечивается в сверхкритическом цикле.

Термодинамическая эффективность циклов определяется термическим КПД циклов и коэффициентом термомеханического преобразования (COP – coefficient of performance), а также эксергетическим КПД (коэффициентом

утилизации). Термический КПД (или COP) определяется согласно выражения:

$$\eta_{\text{т}} = \frac{W_{\text{пол}}}{Q_{2-3}} = \frac{l_{3,4} - l_{1,2}}{Q_{2,3}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{пол}}$ – полезная работа цикла; $l_{1,2}$, $l_{3,4}$ – соответственно работа адиабатического сжатия и расширения в насосе и турбине в обратимом процессе.

Работа повышения давления, выполняемая насосом равняется:

$$l_{1,2} = m(i_2 - i_1) = \frac{m(i_{2s} - i_1)}{\eta_n}, \quad (2)$$

где m – расход рабочего вещества; состояние 2 и 2s соответствуют реальному процессу и изэнтропному; η_n – действительный КПД насоса.

Работа расширения пара в турбине определяется согласно выражения:

$$l_{3,4} = m(i_3 - i_4) = \eta_m m(i_3 - i_{4s}), \quad (3)$$

где η_m – действительный КПД турбины; состояние 4 и 4s соответствуют реальному и изэнтропному процессам.

Эксергетический КПД или коэффициент утилизации определяется как отношение действительной полезной мощности установки к максимальной теоретической мощности, которую можно получить от охлаждения продуктов сгорания:

$$\eta_{\text{э}} = \frac{W_{\text{пол}}}{m_{\text{пр.сг.}} [(i - i_o) - T_o (S - S_o)]}, \quad (4)$$

где $m_{\text{пр.сг.}}$ – расход продуктов сгорания теплогенератора; i , i_o , S , S_o – соответственно энтальпия и энтропия продуктов сгорания при температуре на входе в установку и при температуре окружающей среды; T_o – температура окружающей среды.

Термический КПД цикла (или COP) изменяется в узком диапазоне 0,13-0,16, что недостаточно характеризует эффективность циклов и поэтому более показательным критерием выбора рабочего вещества является работа, получаемая при расширении пара в турбине.

Как было отмечено ранее, наиболее влияющими параметрами на выработку электрической мощности являются давление и температура пара перед турбиной, значение минимального температурного перепада между теплоносителями, концентрация компонент в смеси рабочего вещества и другие параметры.

Существенно влияет на значение вырабатываемой мощности минимальный температурный перепад между греющим теплоносителем и рабочим веществом, который определяет эффективность теплообмена в элементах энергетической установки Δt_{min} . Так, увеличение Δt_{min} от 3 К до 10 К приводит к снижению мощности, которая вырабатывается на

15–20 %. Влияют также значения КПД турбины и насоса. Существенно также увеличение вырабатываемой мощности на 12–20 % при снижении температуры атмосферного воздуха (сезонное влияние) от 25 °С до 0 °С и ниже за счёт изменения температуры теплоносителя в воздушном конденсаторе.

Влияние недокуперации Δt_{\min} в теплообменных аппаратах (регенераторе-испарителе) показано на рис.3.

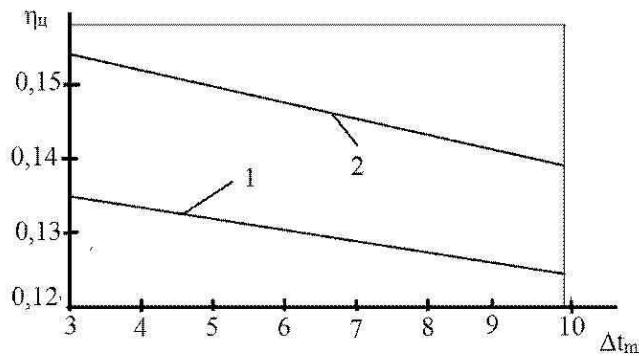


Рис. 3. Влияние степени совершенства теплообменников утилизационной установки на КПД цикла: 1- $t_{\text{пр.с}}=130$ °С; 2- $t_{\text{пр.с}}=200$ °С, рабочее вещество – смесь R600/R141в

Fig. 3. The influence of perfection grade in utilizing plant heat-exchangers on cycle efficiency: 1- $t_{\text{пр.с}}=130$ °С; 2- $t_{\text{пр.с}}=200$ °С, organic working medium – mixture R600/R141в.

Зависимость КПД энергетической установки от КПД паровой турбины показано на рис.4.

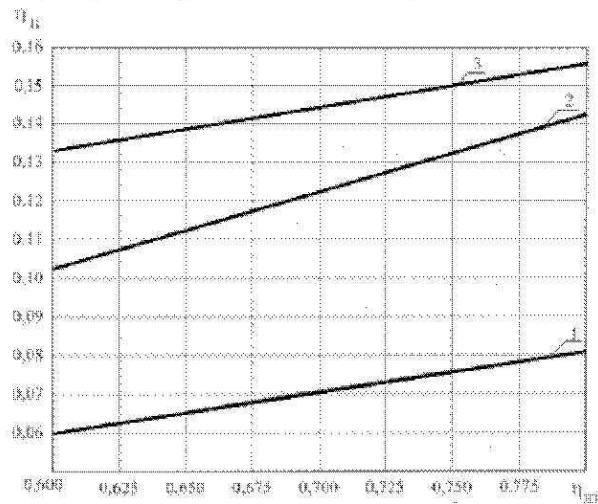


Рис. 4. Влияние КПД турбины на КПД цикла утилизационной установки:

1 – $t_{\text{yx}}=70$ °С, 2 – $t_{\text{yx}}=130$ °С, 3 – $t_{\text{yx}}=200$ °С. Рабочее тело – хладон R 142b.

Fig. 4. The influence of turbine efficiency on cycle efficiency of utilizing plant:

1 – $t_{\text{yx}}=70$ °С, 2 – $t_{\text{yx}}=130$ °С, 3 – $t_{\text{yx}}=200$ °С. Working medium – freon R 142b.

Полученные численные результаты сравнивались с немногочисленными литературными данными по н-пентанному циклу.

При использовании в цикле аммиака вырабатываемая электрическая мощность выше, чем в цикле с н-бутановом, однако, цикл характеризуется более высоким давлением. Смесь аммиака и органического вещества (C_2H_6 -этана) не приводит к существенному увеличению мощности. Более перспективными являются смеси изобутана с н-гексаном и другими веществами (R141в, R161 и др.), характеризующиеся высокими энергетическими и экологическими параметрами. Выработка электрической мощности в цикле (548,81-615,06 кВт), выше чем в н-бутановом цикле [4].

На рис.5 приведены расчётные данные по удельному перепаду энтальпии пара в турбине в зависимости от температуры и давления пара перед турбиной.

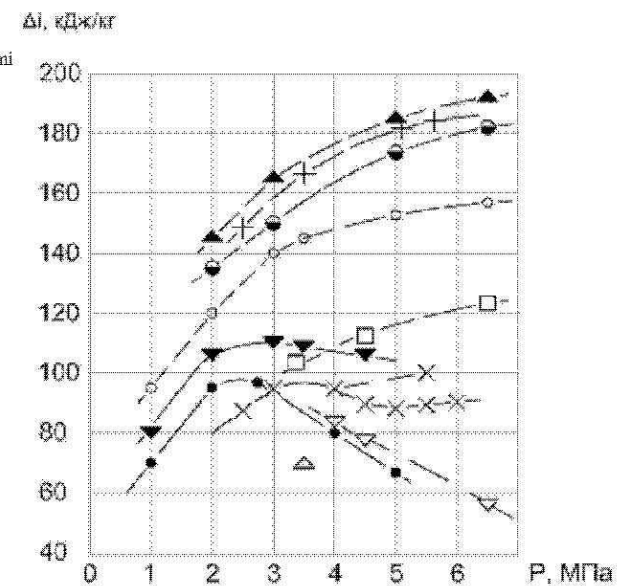


Рис. 5. Зависимость работы расширения пара в турбине от давления и температуры: ● – н-пентан, $t = 200$ °С, [12]; ○ – н-пентан, $t = 300$ °С, [12]; △ – н-пентан, $t = 200$ °С [15]; ▽ – н-пентан, $t = 220$ °С, [15]; ▾ – н-пентан, $t = 220$ °С, [14]; □ – н-пентан, $t = 300$ °С, [15]; × – смесь (i-бутан + R141в(60/40), $t = 200$ °С (авторы); + – н-бутан, $t = 350$ °С (авторы); ▲ – i-пентан, $t = 350$ °С, (авторы); ⊕ – смесь (i-бутан + i-пентан (40/60), $t = 350$ °С (авторы)

Fig. 5. The plot of vapour expansion operation in the turbine from pressure and temperature: ● – n-pentane, $t = 200$ °С, [12]; ○ – n-pentane, $t = 300$ °С, [12]; △ – n-pentane, $t = 200$ °С [15]; ▽ – n-pentane, $t =$

220 °C, [15]; \blacktriangledown – n-pentane, t = 220 °C, [14]; \square – n-pentane, t = 300 °C, [15]; \times – mixture (i-butane + R141b (60/40), t = 200 °C (authors); \oplus – n-butane, t = 350 °C (authors); \blacktriangle – i-pentane, t = 350 °C, (authors); \odot – mixture (i-butane + i-pentane (40/60), t = 350 °C (authors)

Таким образом к входным параметрам отнесем: P_T – давление пара перед турбиной, МПа; t_T – температурой пара перед турбиной, МПа; $P_{конд}$ – давлением пара в конденсаторе.

В качестве выходного параметра принята вырабатываемая электрическая мощность системы N_s .

Математические методы планирования эксперимента позволяют исследовать и оптимизировать сложные процессы, обеспечивая высокую эффективность исследований и точность определения исследуемых факторов [21]. В качестве плана эксперимента был выбран ортогональный план второго порядка, обеспечивающий равенство нулю всех ковариаций между коэффициентами в уравнении регрессии и наивысшую точность вблизи центра плана.

План эксперимента составлен для окрестности точек внутри указанного предела значений переменных (основного уравнения):

$$t_t = \frac{120 + 200}{2} = 160$$

$$P_t = \frac{2,3 + 6}{2} = 4.25$$

$$P_{\kappa} = \frac{0.2 + 0,5}{2} = 0,35$$

Каждый из факторов принимал одно из пяти значений (для кодовых уровней +1, 0, -1 и звездных точек +1,414 и -1,414), вычисляемых по формуле:

$$X_j = x_j \Delta x_j + x_j^0, \tag{5}$$

где X_j - натуральное значение фактора,
 x_j - кодовое значение фактора,
 Δx_j - интервал варьирования j -го фактора,
 x_j^0 - значение j -го фактора на нулевом уровне.

В таблице 1 приведены координаты центра плана, интервалы варьирования и уровни исследования.

Был осуществлен переход от физических переменных t, P_t, P_{κ} к безразмерным кодированным переменным x_1, x_2, x_3 , нормированным так, чтобы они принимали значение +1 для верхнего уровня и -1 для нижнего уровня.

Таблица 4

Характеристика	Кодовое значение фактора	Температура пара перед турбиной	Давление пара перед турбиной	Давление пара в конденсаторе
		t, C°	P _t , МПа	P _к , МПа
Основной уровень		160	4,15	0,35
Интервал варьирования	Δx_j	40	1,85	0,15
Верхний уровень	1	200	6	0,5
Нижний уровень	-1	120	2,3	0,2
Звездные точки	1.414	216,56	6,77	0,56
	-1.414	103,44	1,53	0,14

В таблице 5 представлена матрица планирования эксперимента. Число опытов при этом определяется по формуле [21]:

$$N = 2^k + 2k + n_0 \text{ (при } k < 5), \tag{6}$$

$$N = 2^3 + 2 \cdot 3 + 4 = 8 + 6 + 4 = 18.$$

Здесь n_0 - количество нулевых точек,
 k - количество факторов.

Линейное преобразование квадратичных столбцов x_j^2 проводили по формуле:

$$x_j' = x_j^2 - \bar{x}_j^2 = x_j^2 - \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji}^2}{N}, \tag{7}$$

Таблица 5

№ исп.	Код	Код	X1	Код	X2	Код	X3	Вырабатываемая электрическая мощность системы, N _{ср}
		0	160	0	4.15	0	0.35	электрическая мощность системы, N _{ср}
		-	40	-	1.85	-	0.15	
		+1	200	+1	6	+1	0.5	
		-1	120	-1	2.3	-1	0.2	
								N _{ср}
1	+	-	120	-	2.3	-	0.2	18,2
2	+	+	200	-	2.3	-	0.2	46,2
3	+	-	120	+	6	-	0.2	37,8
4	+	+	200	+	6	-	0.2	50,9
5	+	-	120	-	2.3	+	0.5	16,8
6	+	+	200	-	2.3	+	0.5	22,8
7	+	-	120	+	6	+	0.5	34,3
8	+	+	200	+	6	+	0.5	55,8
9	+	-	103,44	0	4.15	0	0.35	35,4
10	+	+1,414	216,56	0	4.15	0	0,35	53,7
11	+	0	160	-	1.53	0	0.3	17,5

				1,41 4			5	
12	+	0	160	+1,4 14	6.77	0	0.3 5	42,3
13	+	0	160	0	4.15	-1,414	0.1 4	52,1
14	+	0	160	0	4.15	+1,41 4	0.56	53,0
15	+	0	160	0	4.15	0	0.35	37,4
16	+	0	160	0	4.15	0	0.35	38,0
17	+	0	160	0	4.15	0	0.35	37,4
18	+	0	160	0	4.15	0	0.35	38,0

В каждой серии опытов эксперимент проводился трижды, и определялось среднее значение функции отклика.

Для определения ошибки воспроизводимости, необходимой для оценки значимости коэффициентов при установлении адекватности математической модели, были выполнены четыре параллельных опыта на нулевых уровнях факторов (строки 15-18 таблицы 5).

По результатам экспериментов рассчитаны коэффициенты регрессии и их ошибки. Благодаря ортогональности матрицы планирования все коэффициенты регрессии определялись независимо друг от друга по формуле:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{ij} \cdot y_i)}{\sum_{i=1}^N x_{ij}^2}, \quad (8)$$

В результате расчетов по матрице с преобразованными столбцами для квадратичных эффектов получено уравнение вида:

$$Y = b'_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{23} x_2 x_3 + b_{31} x_3 x_1 + b_{123} x_1 x_2 x_3, \quad (9)$$

Для перехода к обычной записи b_0 определяли по формуле:

$$b_0 = b'_0 - b_{11} \cdot \bar{x}_{11}^2 - b_{22} \cdot \bar{x}_{22}^2 - b_{33} \cdot \bar{x}_{33}^2, \quad (10)$$

Значимость коэффициентов уравнения регрессии проверялась по критерию Стьюдента:

$$t_j = \frac{b_j}{S_{b_j}}, \quad (11)$$

где S_{b_j} - дисперсия коэффициентов, определяемая с различной точностью по [21].

В результате обработки опытных данных было получено полное уравнение регрессии в виде:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{23} x_2 x_3 + b_{31} x_3 x_1 + b_{123} x_1 x_2 x_3,$$

где b - коэффициент регрессии,

x - кодированные переменные или факторы, определяемые по формуле (7).

Слагаемые уравнения (11), в которых коэффициенты регрессии незначимы, были исключены из уравнения.

Была также проверена адекватность уравнения регрессии по критерию Фишера:

$$F_p \leq F \quad (12)$$

где F_p – значение критерия Фишера, ($F=8.8$):

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_{восп}^2}, \quad (13)$$

и S_{ad}^2 – дисперсия адекватности, определяемая по формуле:

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{N-B} \times \sum_{j=1}^N (y_{j_{\text{экс}}} - y_{j_{\text{расч}}})^2, \quad (14)$$

$y_{j_{\text{экс}}}$, $y_{j_{\text{расч}}}$ – экспериментальное и расчетное значения функции отклика,

B – число членов уравнения регрессии,

N – число опытов полного факторного эксперимента (в данном случае 18).

В результате опытов с помощью методики планирования эксперимента были получены уравнения регрессии для определения рациональных параметров работы турбины. Эти уравнения были упрощены за счет пренебрежения малыми или незначимыми коэффициентами регрессии с помощью критерия Стьюдента, а само уравнение регрессии проверялось на адекватность с помощью критерия Фишера.

В соответствии с принятым планом трехфакторного эксперимента были проведены опыты, результаты которых приведены в таблице 2.

Определение уравнения регрессии и проверка его адекватности проводилось по описанной выше методике на ПЭВМ в программе “MathCAD-11 Professional”.

В результате получено уравнение регрессии в кодированном виде:

$$Y = 39,557 + 7,874 \cdot x_1 + 9,157 \cdot x_2 - 1,844 \cdot x_3 + 0,439 \cdot x_1^2 - 6,947 \cdot x_2^2 + 4,472 \cdot x_3^2 + 3,275 \cdot x_2 \cdot x_3, \quad (15)$$

Подставляя в (15) значения x_1 , x_2 , x_3 из (7), можно перейти к уравнению регрессии в физических переменных.

Зависимости величины вырабатываемой электрической мощности в зависимости от давления пара перед турбиной, температуры пара перед турбиной и давления пара в конденсаторе представлены на рис. 6.

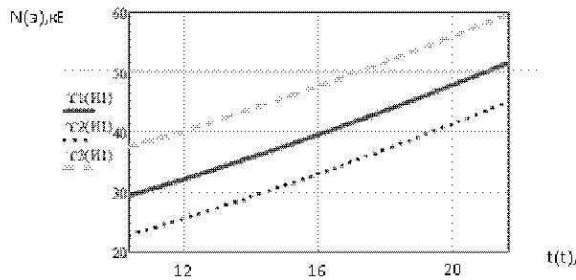


Рис.6. Вырабатываемая электрическая мощность в зависимости от температуры пара перед турбиной
 Y1 - при давлении пара $P_T = 4.15$ МПа и давлении пара в конденсаторе $P_K = 0.35$ МПа
 Y2 - при давлении пара $P_T = 2.3$ МПа и давлении пара в конденсаторе $P_K = 0.2$ МПа
 Y3 - при давлении пара $P_T = 6$ МПа и давлении пара в конденсаторе $P_K = 0.5$ МПа

Fig.6. The plot of the electric power being generated from vapor (steam) temperature before entering the turbine.

Y1 - at steam pressure $P_T = 4.15$ МПа and at steam pressure in the condenser $P_K = 0.35$ МПа

Y2 - at steam pressure $P_T = 2.3$ МПа and at steam pressure in the condenser $P_K = 0.2$ МПа

Y3 - at steam pressure $P_T = 6$ МПа and at steam pressure in the condenser $P_K = 0.5$ МПа

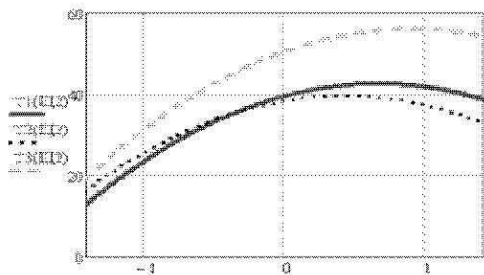


Рис.7. Вырабатываемая электрическая мощность в зависимости от давления пара перед турбиной
 Y1 - при температуре пара перед турбиной $t(t) = 160$ C° и давлении пара в конденсаторе $P_K = 0.35$ МПа
 Y2 - при температуре пара перед турбиной $t(t) = 120$ C° и давлении пара в конденсаторе $P_K = 0.2$ МПа
 Y3 - при температуре пара перед турбиной $t(t) = 200$ C° и давлении пара в конденсаторе $P_K = 0.5$ МПа

Fig.7. The plot of the electric power being generated from vapor (steam) pressure before entering the turbine.

Y1 - at steam pressure at inlet at turbine $t(t) = 160$ C° and at steam pressure in condenser $P_K = 0.35$ МПа

Y2 - at steam pressure at inlet at turbine $t(t) = 120$ C° and at steam pressure in condenser $P_K = 0.2$ МПа

Y3 - at steam pressure at inlet at turbine $t(t) = 200$ C° and at steam pressure in condenser $P_K = 0.5$ МПа

Y1 - at steam pressure at inlet at turbine $t(t) = 160$ C° and at steam pressure in condenser $P_K = 0.35$ МПа

Y2 - at steam pressure at inlet at turbine $t(t) = 120$ C° and at steam pressure in condenser $P_K = 0.2$ МПа

Y3 - at steam pressure at inlet at turbine $t(t) = 200$ C° and at steam pressure in condenser $P_K = 0.5$ МПа

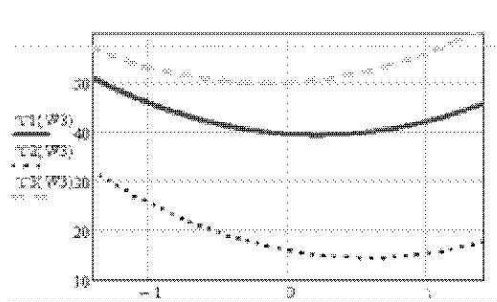


Рис.8. Вырабатываемая электрическая мощность в зависимости от давления пара в конденсаторе.

Y1 - при температуре пара перед турбиной $t(t) = 160$ C° и давлении пара перед турбиной $P_T = 4.15$ МПа

Y2 - при температуре пара перед турбиной $t(t) = 120$ C° и давлении пара перед турбиной $P_T = 2.3$ МПа

Y3 - при температуре пара перед турбиной $t(t) = 200$ C° и давлении пара перед турбиной $P_T = 6$ МПа

Fig.8. The plot of the electric power being generated from vapor (steam) pressure in condenser.

Y1 - at steam temperature at inlet at turbine $t(t) = 160$ C° and steam pressure before turbine $P_T = 4.15$ МПа

Y2 - at steam temperature at inlet at turbine $t(t) = 120$ C° and steam pressure before turbine $P_T = 2.3$ МПа

Y3 - at steam temperature at inlet at turbine $t(t) = 200$ C° and steam pressure before turbine $P_T = 6$ МПа

Трехмерный график зависимости вырабатываемой электрической мощности от температуры пара перед турбиной (X1), давления пара перед турбиной (X2) и давления пара в конденсаторе (X3) построенный по уравнению регрессии (15) показана на рис. 9:

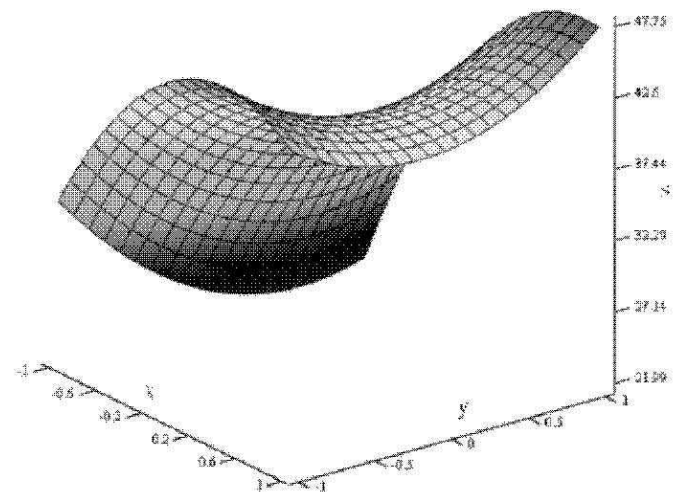


Рис.9. Вырабатываемая электрическая мощность в зависимости от давления пара в конденсаторе и давлении пара перед турбиной при постоянной температуре пара перед турбиной (X1=0)

Fig.9. The plot of the electric power being generated from steam pressure in the condenser entering the

turbine at constant steam temperature before entering the turbine ($X1=0$)

ВЫВОДЫ

В работе приводятся результаты численного исследования циклов Ренкина с органическими веществами.

Показана эффективность рабочего вещества – смеси (i-бутан/R141b) в циклах с температурой пара до 200 °С и смеси (гептан/водяной пар) с температурой пара до 350 °С. Получено регрессионное уравнение для расчёта вырабатываемой электрической мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. DiPippo R., 2005. Geothermal Power Plants: Principles, Applications and Case Studies. Oxford OX51GB, UK. – 450.
2. Алхасов А.Б., 2008. Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. - С.-Пб.: ФИЗМАТЛИТ. – 376.
3. Редько А.А., 2010. Методы повышения эффективности систем геотермального теплоснабжения. - Макеевка: ДонНАСА. – 302.
4. Пятничко В.А., 2002. Утилизация низкопотенциального тепла в энергетических установках с органическими теплоносителями. – №5. – 10-14.
5. Артеменко С., 2010. Выбор рабочих тел для низкотемпературных циклов Ренкина на органических веществах. – Холодильна техніка и технологія. – Т.123. – № 1. – 6 – 10.
6. Редько А.А., 2010. Рациональные термодинамические параметры циклов многоступенчатой геотермальной станции. Проблемы машиностроения. ИПмаш НАНУ. – т.13. – №4. – 76-82.
7. Шварц Г.В., С.В. Голубев, Б.П. Левыкин и др., 2000. Утилизационные энергетические установки с органическими теплоносителями. Газовая промышленность. – №6. – 14 – 18.
8. Б.И. Басок, 2006. Анализ когенерационных установок. Классификация и основные показатели. Промышленная теплотехника. – 2006. – т.28. – №3. – 83 – 89.
9. Басок Б.И., Коломейко Д.А., 2006. Анализ когенерационных установок. Анализ энергетической эффективности. Промышленная теплотехника. – 2006. – т.28. – №4. – 79 – 83.
10. Степаненко В., 2005. Реконструкция промышленной энергетики Украины в 21 веке. – ЭСКО. – 2005. – №7.
11. Долинский А.А., Басок Б.И., Коломейко Д.А., 2008. Эффективность когенерационных тепловых схем. К.: ИТТР. – т.61, вып.4в. – 2008. – 30 – 38.
12. Барков В.М., 2004. Когенераторные технологии: возможности и перспективы «ЭСКО» электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы» . – №7. – 2004.
13. Гринман М.И., В.А. Фомин., 2010. Перспективы применения энергетических установок с низкокипящими рабочими телами. Новости теплоснабжения. – №7. – 13–18.
14. Бухолдин Ю.С., Северин А.С., Татаринов В.М., Шахов С.В., 2010. Повышение эффективности и надежности компрессорных станций магистральных газопроводов. Технические газы. – №3. – 60 – 65.
15. Билека Б.Д., В.Я. Кабков, Р.В. Сергиенко, 2011. Особенности выбора начальных параметров безводного цикла Ренкина для энергетических установок, утилизирующих сбросную теплоту приводных газотурбинных установок компрессорных станций. – №2. – 2011. – 138–140.
16. Редько А.А., Павловский С.В., 2012. Выбор рабочего вещества для когенерационного силового контура котельного агрегата. Энергетика и электрификация. – 2012. – №2. – 24–27.
17. Матвеев В.А., Ильяшенко И.С., Давыдова К.Ю., 1988. Выработка пара с энергетическими параметрами при утилизации теплоты отходящих газов стекловаренных печей. Стекло и керамика. – 1988. – N4. – 7 – 9.
18. Редько А., 2012. Технологические схемы комбинированной выработки теплоты и электроэнергии стекловаренных печей. MOTROL. – Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences. – Lublin. – Vol.14. – N6. – 114–120.
19. Редько А.А., 2013. Термодинамическая эффективность процессов преобразования низкопотенциальной теплоты в энергетических установках с органическим теплоносителем. Доповіді Національної Академії Наук України. – 2013. – N3. – 71 – 75.
20. Шубенко А.Л., Бабак Н.Ю., Сенецкий А.В. и др., 2012. Утилизация сбросной теплоты технологических процессов промышленного предприятия с целью выработки электроэнергии. Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – N7(101). – 23 – 29.
21. Возняк О.Т., 2012. Планування експерименту та оптимізація вирішень у системах теплогазопостачання та вентиляції. Львів: Видавництво Львівської політехніки. – 164.

MATHEMATICAL MODELLING OF PARAMETERS OF UTILIZING ENERGY PLANT WITH THE ORGANIC WORKING MEDIUM

Summary. The processes of converting low potential heat into electric energy in utilizing plants with organic working medium are investigated. The influence of heat-physical heat-exchanger properties on the efficiency of the conversion processes and plant parameters are shown. Regression equations for calculating plant power depending on influential parameters are presented.

Key words: utilizing energy plant; organic working medium; electric power; efficiency of the conversion processes.

УСИЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТОВ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЯ

Владимир Савйовский¹, Артем Савйовский²

¹Харьковский национальный университет строительства и архитектуры
Украина, г. Харьков, ул. Сумская, 40 E-mail: savyovsky@ukr.net

²Научно-исследовательский институт строительного производства
Украина, г. Киев, Краснозвездный проспект, 51 E-mail: savyovskyy@yahoo.com

Аннотация: В статье освещен опыт производства строительных работ по усилению фундаментов существующего гражданского здания. Проведен анализ организационно-технологических решений производства работ и приведены технико-экономические показатели строительного процесса.

Ключевые слова: реконструкция зданий, усиление фундаментов, захватки

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации строительные конструкции существующих зданий постепенно изнашиваются физически и морально. Физический износ является следствием «старения» строительных материалов, а также воздействий на них различных факторов, как климатические воздействия, техногенная деятельность и прочее. В этой связи требуется периодически осуществлять мероприятия по поддержанию строительных конструкций в состоянии пригодном для нормальной и безопасной эксплуатации. Анализ технического состояния строительных конструкций существующих зданий показывает, что достаточно частыми причинами повреждений и деформаций являются просадки фундаментов [5, 6, 7, 8, 11, 12, 16, 18]. Проседания фундаментов происходит в основном из-за увлажнения грунтов оснований, которые вызваны протечками водопроводных сетей, попаданием сточных вод, изменением уровня грунтовых вод. По этому, в практике реконструкции зданий старой застройки достаточно часто приходится прибегать к работам по усилению фундаментов. Выполнение таких работ сопряжено с целым рядом особенностей. Эти особенности обусловлены расположением зданий в плотной городской застройке. К числу указанных особенностей следует отнести стесненность объектов, наличие множества подземных и наземных коммуникаций, ветхость строительных конструкций, условия эксплуатации реконструируемого здания, невозможность предварительного детального обследования строительных конструкций фундаментов и другое [4, 7, 10, 15, 17]. Указанные особенности приводят к существенному увеличению затрат на производство строительных работ, которые необходимо предварительно объективно оценить на стадии подготовки к реконструкции здания. По этому исследование практического опыта производства строительных работ по усилению фундаментов имеет важное значение для выработки рациональных организационно-технологических решений производства работ с учетом указанной выше специфики.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МЕТОДОВ

В процессе разработки проектной документации на реконструкцию части здания в городе Харькове был проведен комплекс работ по обследованию существующих строительных конструкций с целью определения их технического состояния и оценке возможности применения проектируемых архитектурно-конструктивных решений [1, 4, 8, 16]. При проведении технической диагностики строительных конструкций здания были установлены сведения относительно истории строительства и эксплуатации здания. Здание 4-х этажное, сложной планировочной конфигурации. Здание было построено ориентировочно в 1914 году и является памятником архитектуры местного значения, рис.1. Фундаменты, наружные и внутренние стены здания выполнены из глиняного обыкновенного кирпича на известково-песчаном растворе. Толщина фундаментов (стен подвала) составляет около 700,0 мм. Перекрытие над подвалом железобетонное по металлическим балкам. Междуетажные перекрытия – деревянные. В процессе реконструкции предполагалось выполнить работы по реконструкции помещений 1-го этажа и павала под торгово-офисный центр. Во 2-м, 3-м и 4-м этажах расположены жилые помещения. Производство строительных работ по реконструкции предполагалось осуществлять без временного выселения жильцов жилых этажей.

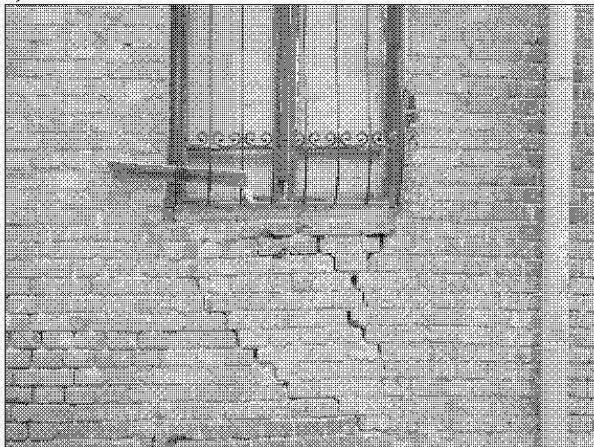
В процессе технической диагностики здания было установлено, что на поверхности строительных конструкций имеется ряд повреждений и деформаций, которые свидетельствуют о снижении несущей способности. Характерными дефектами являются наклонные и вертикальные трещины кладки стен, особенно в местах расположения клинчатых перемычек, рис.2. Стальные балочные конструкции перекрытия над подвалом подвержены коррозии, имеют прогибы, превышающие предельно допустимые значения. Также было установлено, что в различные каналы, отверстия, проемы. Неоднократно происходили аварии водопроводных сетей в результате чего увлажнялись грунты оснований фундаментов. Все это существенно ослабило несущую способность фундаментов и стен здания.



Рис.1 Общий вид здания подлежащего реконструкции
Fig. 1 General view of the building of a subject of reconstruction



а)



б)

Рис. 2. Общий вид характерных повреждений фасада здания: а- наклонные и вертикальные трещины карнизного элемента; б- наклонные трещины кладки стен

Fig. 2. General view of characteristic injuries of a facade of the building: а - inclined and vertical cracks of an eaves element; б- inclined cracks of a laying of walls

процессе, почти 100-летней эксплуатации помещения здания многократно перестраивались, устраивались. Кроме того, фактическая высота подвала составляла всего 2200,0 мм. Эта высота не обеспечивала бы нормальной эксплуатации помещения под торговые площади после реконструкции. В этой связи было принято решение об усилении фундаментов. В практике реконструкции зданий и сооружений накоплен богатый арсенал конструктивных решений по усилению указанных конструкций [5, 6, 7, 11, 12, 18]:. Многие из этих способов доведены до уровня типовых. Принципиальные решения по усилению фундаментов выбирают в зависимости от значения и характера нагрузок, инженерно-геологических и гидрогеологических условий площадки, а также конструктивных особенностей фундаментов и всего здания в целом. Немаловажным для принятия решений являются условия производства работ с учетом особенностей реконструкции, а также последующий режим эксплуатации зданий и ряд других факторов.

Усиление фундаментов может осуществляться следующими группами способов:

- укреплением различными инъекциями,
- увеличением опорной площади,
- передачей нагрузок на нижележащие слои грунтов,
- подведением дополнительных конструктивных элементов или полной заменой.

Трудоемкость выполнения указанных работ определена из расчета на квадратный метр опорной площади фундаментов.

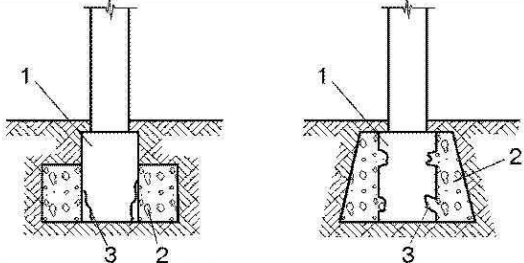
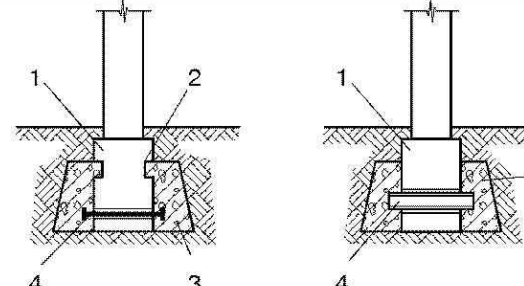
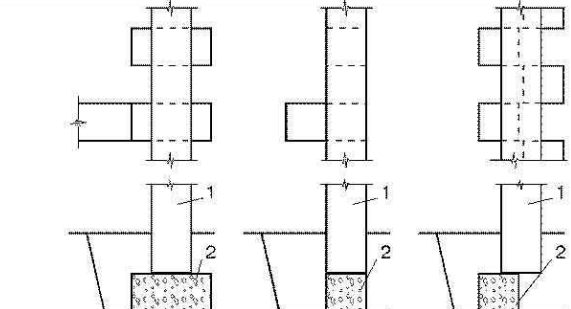
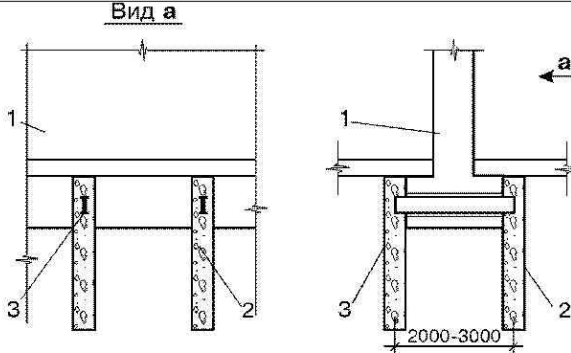
Наиболее распространенные схемы устройства конструкций усиления [5, 7, 10, 12] и удельная трудоемкость выполнения работ представлены в таблице 1. Как свидетельствуют результаты исследований (таблица 1), трудоемкость выполнения указанных работ существенно отличается. При этом существенное значение при выполнении данных работ имеет комплекс земляных работ с учетом их специфики.

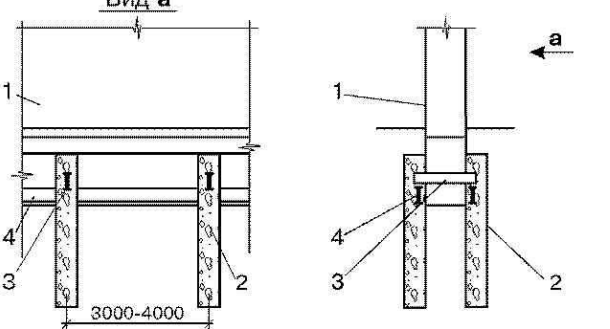
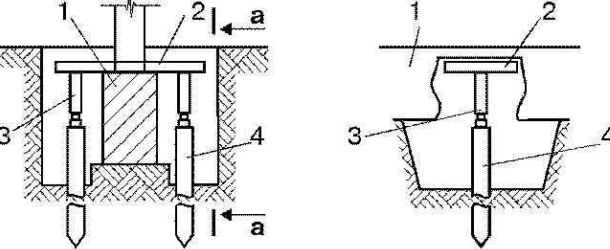
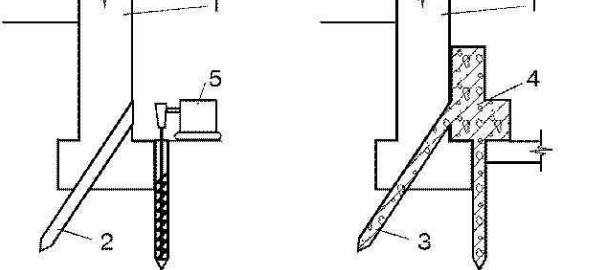
С учетом указанных выше особенностей, технического состояния строительных конструкций и предполагаемых архитектурно-конструктивных решений было принято решение об усилении фундаментов всех наружных и внутренних стен части здания путем подведения под них дополнительных элементов. Заглубление дополнительных элементов позволит в последствии увеличить высоту подвального этажа до 2700,0 мм.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

На основании разработанной проектной документации, был разработан проект организации строительства и производства работ [1, 2, 3, 4]. С учетом принятых в проекте производства работ приступили к производству работ. Технологическая последовательность работ включала 2 этапа: подготовительный и основной.

Таблица 1. Схемы усиления фундаментов и удельная трудоемкость работ (чел.-час/м² опорной площади)
 Table 1. Schemes of strengthening of the bases
 and specific labor input of works (the people - hour/sq.m of the basic area)

№ п/п	Вариант усиления	Конструктивная схема	Трудоемкость, чел.-час/м ²
1	Устройство бетонных обойм	 <p>1— усиливаемый фундамент; 2— бетонная обойма; 3— штрабы в существующем фундаменте</p>	7,2
2	Устройство железобетонной обоймы	 <p>1— усиливаемый фундамент; 2— штрабы; 3— железобетонная обойма; 4— поперечная металлическая или железобетонная балка</p>	7,9
3	Подведение под фундаменты новых конструктивных элементов	 <p>1— существующий фундамент; 2— подведенные конструктивные элементы</p>	12,9
4	Устройство набивных выносных свай	<p>Вид а</p>  <p>1— усиливаемый фундамент; 2— набивные сваи; 3— поперечные балки</p>	13,1

5	То же с продольными балками	 <p>1— усиливаемый фундамент; 2— набивные сваи; 3— поперечные балки; 4— продольные балки</p>	14,7
6	Устройство вдавливаемых свай	 <p>1— усиливаемый фундамент; 2— железобетонная поперечная балка; 3— домкрат; 4— трубчатая свая</p>	14,8
7	Устройство буронабивных свай	 <p>1— усиливаемый фундамент; 2— скважина; 3— буронабивная свая; 4— железобетонный ростверк; 5— буровой станок</p>	15,2

1-й этап: выполнены работы по обследованию строительных конструкций существующего здания и прилегающих объектов. На основании результатов обследований и градостроительных ограничений была разработана и согласована в установленном порядке проектная документация; подрядчиком был разработан проект производства работ; проведен комплекс подготовительных работ, включающих обеспечение строительной площадки средствами безопасности производства работ и безопасности жителей дома. Для этого были установлены предупреждающие знаки, ограждение участка производства работ. Над входами в здание были установлены защитные козырьки и надписи. Предусмотрены противопожарные мероприятия и подключение к инженерным коммуникациям для нужд строительства;

2-й этап: непосредственное выполнение строительных работ. Проектом организации строительства предусмотрено существующие

ленточные фундаменты здания условно разделить на захватки, длиной около 1000,0 мм. При этом число захваток не менее 6, рис.3. Работы по разработке грунта разрешается выполнять только на одноименных захватках. Данная разбивка позволяла выполнять работы по подведению новых элементов фундаментов без риска просадок участков стен существующего здания. Технологическая последовательность работ приведена в таблице 2.

С учетом особой стесненности объекта основная часть работ выполнялась вручную. Это обусловлено также наличием в грунтах отдельных включений инородных тел, а также необходимостью постоянного мониторинга технического состояния грунтов и существующих фундаментов. Проведенные предварительно работы по усилению конструкций стен подвала (закладка проемов, бетонирование ниш, борозд) позволило обеспечить равномерное распределение нагрузок на весь массив

фундаментов. Разработанный грунт пакетировался в мешки и выносился для вывоза с подвального помещения. Необходимые средства производства работ (инструменты, приспособления, опалубка), а также строительные материалы подвезлись через существующие оконные проемы со стороны дворового фасада здания. Учитывая постоянную эксплуатацию здания, поставка строительных материалов и вывозка продуктов разборки (грунта) осуществлялось в установленное время. Применялись средства малой механизации, что позволило уменьшить шум и пылевыделение при

производстве строительных работ. Арматурные сетки для армирования устраиваемых фундаментов поставлялись в готовом виде. После разработки грунта на 6-8 захватках на объект доставлялась бетонная смесь при помощи автобетоносмесителей. Бетонная смесь подавалась по лотку в бадьи, установленные в подвальном этаже. Бетонная смесь сразу же укладывалась в устроенные шурфы и уплотнялась при помощи глубинных вибраторов. Как было указано в таблице 2 бетонная смесь укладывалась на высоту около 600,0 мм.

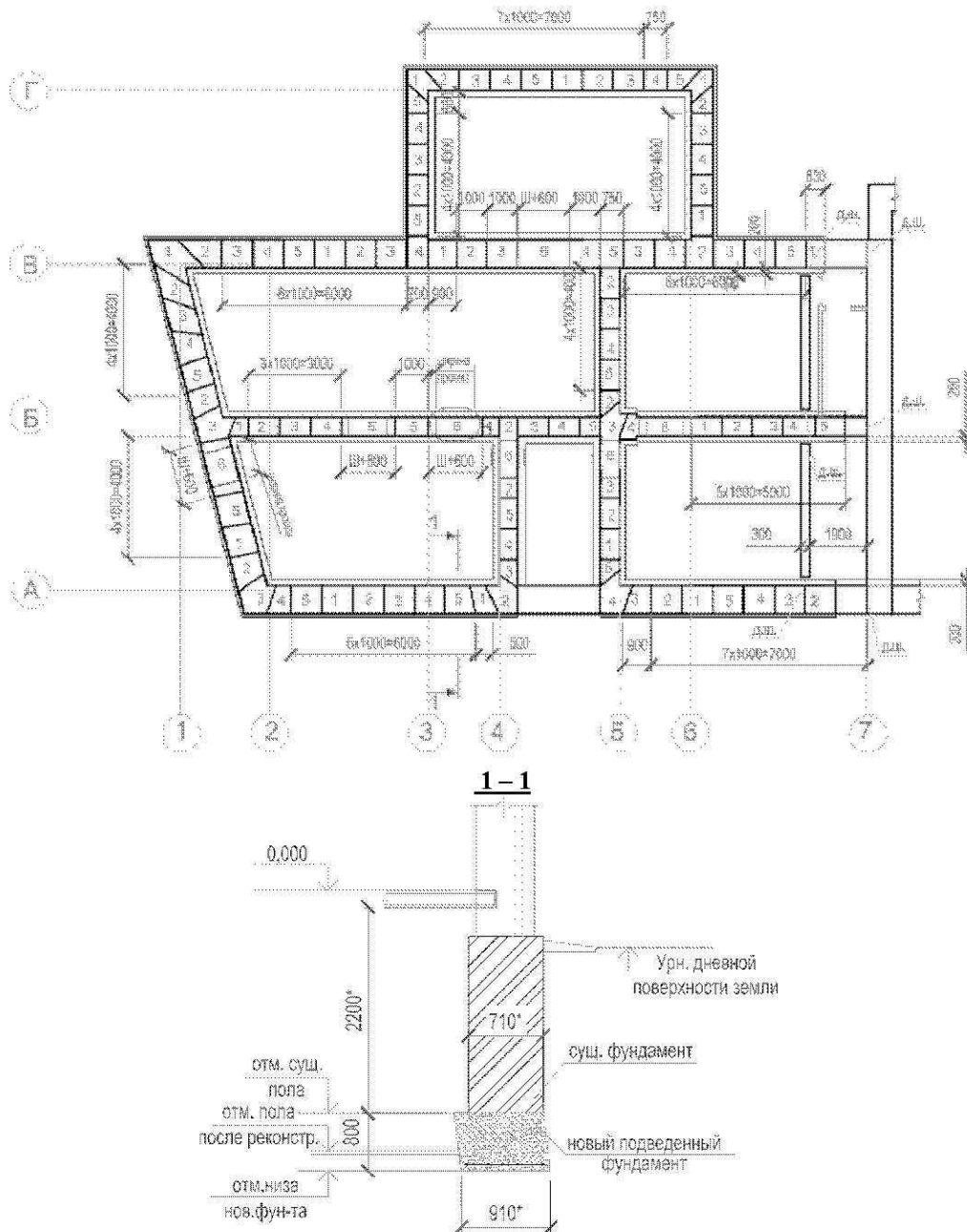
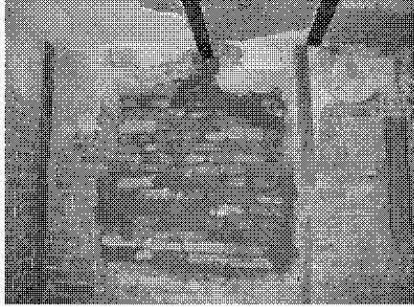

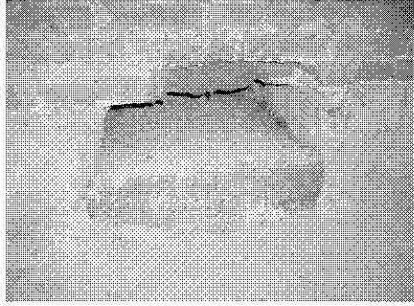

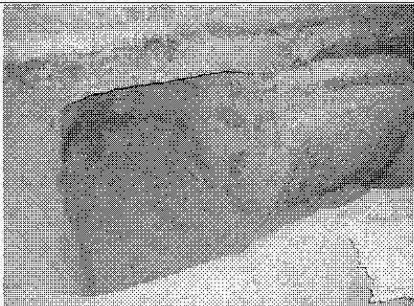


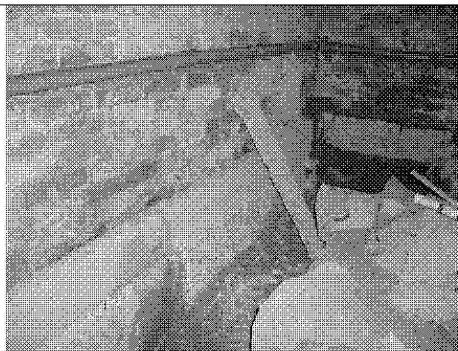
Рис. 3. Схема разбивки фундаментов на захватки: 1... 6 – номера захваток
Fig. 3. The scheme of breakdown of the bases on catches: 1 ... 6 – numbers of catches

Таблица 2. Технологическая последовательность усиления фундаментов
путем подводки дополнительных элементов

Table 2. Technological sequence of strengthening of the bases
by an eyeliner of additional elements

Выполняемые работы	Фотофиксация этапов производства работ
<p>Устранение выявленных на поверхности стен подвала повреждений и деформаций (закладка всех устроенных ранее проемов, заделка трещин, бетонирование ниш и борозд). После выполнения указанных мероприятий было разрешено приступить к работам по усилению фундаментов;</p>	
<p>На одноименных захватках (№№ 1) были выполнены работы по разработке грунта на глубину около 800,0 мм на длину захватки около 1000,0 мм и на всю ширину подошвы фундамента</p>	
<p>На указанных захватках (в устроенных выемках) были установлены арматурные сетки, установлена опалубка (со стороны разработки грунта) и выполнена укладка и уплотнение бетонной смеси нижнего слоя на высоту около 600,0 мм выемки</p>	
<p>После технологического перерыва, составляющего несколько дней, была выполнена укладка последующего слоя бетонной смеси толщиной около 200,0 мм. Укладка этого слоя осуществлялась бетонной смесью более высокого класса. Использовалась малоподвижная бетонная смесь, которая укладывалась методом виброзачеканки. Этот технологический прием был принят для уменьшения усадочных процессов бетона и соответственно для исключения возможных осадок фундаментов здания</p>	
<p>После достижения бетоном проектной прочности, были выполнены работы по распалубке конструкций и приступили к разработке грунта на захватках под №№ 2 и так далее</p>	

В результате последовательного выполнения работ по проектным захваткам была устроена дополнительная железобетонная лента высотой около 800,0 мм и шириной на 200,0 мм шире ранее существовавшей подошвы фундамента под всеми наружными и внутренними стенами подвала



После чего делался технологический перерыв для проектного твердения бетона. В реальных условиях это происходило в течении 2-х дней. Далее укладывался верхний слой бетона, толщиной около 200,0 мм. Укладка данного слоя осуществлялась жесткой бетонной смесью методом виброзачеканки. После достижения бетоном проектной прочности выполнялась разборка опалубки. Следует отметить, что при устройстве подводимых элементов на участках расположения дверных проемов в наружных и внутренних стенах работы выполнялись после устройства примыкающих участков. То есть вначале выполнялись работы по устройству элементов усиления с двух сторон дверного проема, а потом и под самим проемом. При этом конструкция устраиваемого участка выполнена в виде так называемой «обратной» перемычки. Указанная перемычка предназначена для восприятия нагрузок от отпора грунта в дверном проеме. Грани перемычки выходят за грани проема на 300,0 мм с каждой стороны (см. рис.3). Описанные технологические процессы осуществлялись на всех захватках, пока под всеми ленточными фундаментами не были устроены дополнительные элементы в виде ленты.

После окончания работ по устройству дополнительных железобетонных фундаментов были выполнены работы по разработке грунта на глубину около 500,0 мм. Подведенная часть фундаментов оказалась заглубленной в грунт на глубину около 300,0 мм. Разработанный грунт пакетировался и выносился для вывоза.

Весь процесс производства работ по усилению и заглублению фундаментов сопровождался ведением журнала работ и составлением актов на скрытые работы. При производстве строительных работ осуществлялось научно-техническое сопровождение работ по объекту, согласно требований норм [1, 2, 3] и постоянный мониторинг технического состояния строительных конструкций существующего и примыкающего здания.

После выполнения всего комплекса работ под подошвой существующего фундамента образовалась монолитная железобетонная лента. Это дало возможность обеспечить требуемую

проектную высоту помещений подвала, составляющую около 2700,0 мм.

С учетом условий непрерывной эксплуатации помещений верхних этажей здания, строительные работы выполнялись в основном вручную. Грунт разрабатывался вручную, пакетировался и выносился на улицу для вывоза. Бетонная смесь нижних слоев укладывалась через оконные проемы по лоткам непосредственно в разработанные выемки (захватки). Верхний слой бетона укладывался вручную. Работы по разработке грунта пола подвала выполнялись тоже вручную.

ВЫВОДЫ

Анализ организационно-технологических решений выполнения работ по усилению фундаментов показал, что интенсификация строительных работ здесь весьма ограничена из-за необходимости устройства технологических перерывов для приобретения бетоном проектной прочности [14, 15, 19, 20]. Как раз в периоды технологических перерывов выполнялись работы по транспортировке грунта и другие работы (подготовка арматурных каркасов, опалубки, прочее). Общая продолжительность работ составила около 60 рабочих дней. Работы выполняла бригада, состоящая из 8-ми человек. В общем, трудоемкость выполнения работ по усилению фундаментов составила около 6,85 чел.-дн./ м. п. ленточного фундамента [8, 12, 16]. Резервы сокращения продолжительности и трудоемкости работ были выявлены только исходя из следующих технологических особенностей:

- укладка бетонной смеси осуществлялась при помощи лотков непосредственно в опалубку захваток;
- рациональное планирование технологических процессов, включающее выполнение комплекса параллельных работ в период технологических перерывов необходимых для твердения бетона. Указанные резервы позволили сократить общую продолжительность работ ориентировочно на 18 дней.

Практический опыт применения описанного способа усиления фундаментов позволяет сделать следующие выводы:

- примененный метод предусматривает использование для производства строительных работ только внутренне пространство неэксплуатируемого подвала;
- установлено, что повышение эффективности строительных работ может быть достигнуто за счет тщательного анализа технического состояния строительных конструкций существующего здания и условий производства работ, детального комплекса инженерной подготовки;
- снижение трудоемкости и продолжительности работ может быть достигнуто за счет частичной механизации работ, а также за счет совмещения строительных процессов в периоды технологических перерывов;
- постоянный мониторинг технического состояния строительных конструкций существующего и примыкающего здания обеспечил безопасность выполнения работ и эксплуатации здания.

Приведенный детальный анализ опыта производства работ и указанные выводы позволят выполнять аналогичные работы с учетом выявленных на данном объекте особенностей, и обеспечит более рациональную разработку технологической документации и позволит оптимизировать технико-экономические показатели процесса производства строительных работ

ЛИТЕРАТУРА

1. ДБН А.3.1- 5 - 2009 Організація будівельного виробництва - К.: Держкомістбуд України, 2012.-96.
2. ДБН В.1.2-5:2007 Науково-технічний супровід будівельних об'єктів. Мінрегіонбуд України. -К.; 2007.-14.
3. ДБН А.3.2-2-2009 «Охрана труда и промышленная безопасность в строительстве». Минрегионстрой Украины -К.: 2012.
4. ДБН В.3.1-1-2002 Ремонт и усиление несущих и ограждающих строительных конструкции и оснований промышленных зданий и сооружений. - К.: Госстрой Украины. 2003. - 82.
5. Коновалов П.А. 1988 Основания и фундаменты реконструируемых зданий.-2-е изд., перераб. и доп.- М.: Стройиздат.-287.
6. Савйовский В.В. 1997 Технология реконструкции . -Харьков: Основа.- 256.
7. Савйовский В.В., Болотских О.Н. 1999 Ремонт и реконструкция гражданских зданий. - Харьков: Ватерпас. - 288.
8. Савйовский В.В. 2013 Усиление фундаментов при реконструкции зданий. Будівництво України. №1. 15-18.
9. Савйовский В.В. 2008 Техническая диагностика строительных конструкций зданий. - Х.: Изд-во ФОРТ. 560.
10. Савйовський В.В. 1994 Будівельно-монтажні роботи в умовах реконструкції. -К.: ІСДО.- 156.
11. Савйовский В.В., Харнам М.В., Шмигер П.М. 2006 Усиление фундаментов реконструируемого здания устройством вдавливаемых свай. Науковий вісник будівництва. - Вип. 39. - Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. - 204 - 212.
12. Савйовский В.В. 2011 Диссертация на соиск. уч. степени доктора техн. наук. ХГТУСА.
13. СНиП 3.02.01-87 1998 Земляные сооружения, основания и фундаменты. -М.:Госстрой СССР. 121.
14. Савйовський В.В., Савйовський А.В. 2009 Оцінка ефективності будівельних робіт при реконструкції будівель Коммунальное хозяйство городов.-Вып. 86. - К.: Техніка. -40-44.
15. Савйовский В.В., Броневицкий А.П. Савйовский А.В. 2008 Влияние технического состояния строительных конструкций на технико-экономические показатели реконструкции. Вестник Инженерной Академии Украины.-Вып.1.-К.-21-22.
- 16.Савйовський В.В., Сухорукова Т.Г. 2013 Опыт устройства подвальных помещений при реконструкции здания. Науковий вісник будівництва. - Вип. 71 - Харків: ХДТУБА. - 182-185.
17. Савйовский В.В. 2011 Методика проведения обследований строительных конструкций зданий. Науковий вісник будівництва. - Вип. 65 - Харків: ХДТУБА.- 81-86.
18. Савйовський В.В., Савйовський А.В. 2007 Підсилення фундаментів влаштуванням здавлюваних паль. Будівництво України.-К.- № 4.- 16-18.
19. Савйовский В.В. 2007 Безопасность эксплуатации зданий - важнейшая задача строительного комплекса современности. Вісник Інженерної академії України. -Вип. 2. - К.: ДП «Друкарня МВС України». - 134-136.
20. Свищ И. 2012 Снижение энерго и ресурсоемкости при использовании гиперпластифицирующих добавок в бетонах / Игорь Свищ, Александр Шевчук // MOTROL. — Commission of motorization and energetics in agriculture : Polish Academy of sciences. — Lublin. — Vol. 14, № 6. — 107—112.

STRENGTHENING OF THE BASES AT BUILDING RECONSTRUCTION

Summary: In article experience of production of construction works on strengthening of the bases of the existing civil building is shined. The analysis of organizational and technological solutions of works is carried out and technical and economic indicators of construction process are given.

Key words: reconstruction of buildings, strengthening of the bases, catches

ТЕНДЕНЦИИ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ОТОПИТЕЛЬНО— ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ ТЕХНИКИ БУДУЩЕГО

Игорь Щекин

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры
Адрес: Украина, г. Харьков, ул.Сумская,40

Аннотация. Выведены объективные тенденции и закономерности для построения сценария будущего развития отопительно—вентиляционной техники (ОВТ). В рамках статьи кратко обоснованы основы стратегического сценария развития ОВТ: состав функции цели и факторов её значимости, определение предела совершенствования технических устройств, формирования объективного срока службы, учета принципа соответствия новой разработки достигнутому научно—техническому и производственному потенциалу общества, соответствия мировому техническому уровню.

Ключевые слова: тенденции, закономерности, функция цели, идеальность, жизненный цикл, принцип соответствия, мировой технический уровень.

ВВЕДЕНИЕ

Начав с изобретения колеса и приручения огня, человечество встало на технический путь своего развития. Технические устройства в развитии от примитивных до нынешнего «совершенства» способствовали улучшению комфортности жизнедеятельности людей. Пройдя сквозь кризисы и потрясения, достигнув высокого уровня потребления, комфортности и общественного сознания, человечество неизбежно приходит к выводу, что дальнейшее продвижение технического направления развития имеет не только положительные, но и отрицательные стороны. Естественный эгоизм технического развития человеческого общества превратил его в «машинное общество», исключив гармонию с природой. Существование будущего общества будет связано с решением задач энергетического, экологического, ресурсного и других направлений. Вся техническая мощь общества, его потенциал будут направлены на создание комфортных и безопасных условий жизнедеятельности человека.

Различные исследователи неоднократно пытались представить себе будущее развитие как человеческого общества [9], так и среды обитания [2;7;8]. Многочисленные прогнозы [1;3;5;12;] будущего не базировались на объективных тенденциях [10] развития общества планеты. Сценарии развития ОВТ, в прошлом, не охватывали комплекс объективных взаимосвязей, не определяли генеральные направления, ограничиваясь рассмотрением локальных проблем. Аналитические исследования и конструкторские разработки отопительно—вентиляционной техники в последние десятилетия можно охарактеризовать как «прогресс по мелочам», подкрепляемый излишним наукообразием.

Разработка представлений о будущих технических устройствах (ОВТ), на наш взгляд, **должно базироваться на тенденциях, зависимостях и закономерностях развития человечества и показывать объективные пути решения этого направления в гармонии с нашей планетой.** Представляет интерес определение объективных тенденций и

закономерностей развития технических устройств, используя которые, можно достоверно разработать стратегический сценарий будущего развития оборудования и систем ОВТ.

Слепой поиск — дело неблагодарное и затратное, для успеха нужно точно знать, что именно ищешь и зачем, должны быть известны или прогнозированы направление движения, и учтены все препятствия на пути развития отрасли.

Формирование сценария развития технического направления.

Стратегические и тактические сценарии (прогнозы) будущего развития ОВТ должен отвечать определенным нами [15...19] главным тенденциям и закономерностям, а именно:

- базироваться на принципах **«натурфилософии»**;
- соответствовать **«принципу цели»** — иметь реальную, физическую и позитивную цель с конкретным сроком реализации;
- программа действий должна быть определена по **«факторам значимости»** и тезаурусу негативных вызовов планеты перед человечеством;
- соответствовать принципу **«идеальности»** в достижении предела совершенства ОВТ;
- отвечать закономерностям **«жизненных циклов»** технических устройств;
- учитывать **«принцип соответствия»** новой разработки научному, техническому и социальному потенциалу общества;
- соответствовать достигнутому **«мировому техническому уровню»** или превышать его.

Программы развития технических устройств без учета этих закономерностей будут иметь ограниченный или виртуальный вид.

Тактические прогнозы.

Человечество в лице конкретного человека предоставляет своё развитие, воле случая («судьбе»), стремясь к удовлетворению кратковременных потребностей. Решения тактических задач могут

иметь значение как для отдельного индивидуума, так и для коллектива, общества, государства.

Тактические прогнозы создают обманчивую сиюминутную «безопасность», имитацию ликвидации неприятной ситуации, приводя в итоге в нашей жизни к решению вопросов типа «ямочного ремонта на автодорогах» или постоянного «латания дыр» в коммунальном хозяйстве, реконструкции объектов и инженерных систем. Одни тактические предложения, в отрыве от стратегии развития, решают задачи, как правило, за счет других направлений или даже вопреки им. Сегодня, как жест отчаяния, в нашей стране рекламируется предложение по сжиганию сена, соломы и другого низкокалорийного топлива для экономии дефицитных углеводородных энергоносителей. При этом опускаются негативные стороны этого предложения: вывод из оборота сельского хозяйства естественного удобрения, ухудшения состава почвы, исключения корма для скота, увеличенное пылегазовых выбросов и т.д.

Такие тактические решения ничего, кроме вреда, принести не могут.

Стратегические прогнозы.

Любой стратегический прогноз — это попытка заглянуть в будущее и попытаться представить себе пути его реализации.

Определение термина «стратегия» наиболее удачно представлено в военной науке, где военная доктрина является производной от политического строя государства, его экономики, развития производства и морально — психологических возможностей общества.

Абстрагируясь от военной риторики, заменив военные термины, на определения «отопление, вентиляция, кондиционирование воздуха», отметим, что эти положения могут быть отнесены и к ОВТ.

Стратегический сценарий будущего развития технического направления не всегда может быть определен точно. Это связано с неопределенностью наших реалий, с непредсказуемостью мира в целом и действиями людей.

Стратегический сценарий в теоретическом плане может носить вероятностный характер, часто может быть сведен к предвидению.

Идея, гипотеза или теория становится научной с того момента, как она оправдывается практикой. Можно согласиться, что «подтверждение способности предвидеть — это своего рода сертификат научности».[1]

Стратегические крупные планы (среднесрочные или долгосрочные) под силу или крупным фирмам или государственным структурам.

Стратегия развития ОВТ должна соотноситься со стабильностью страны и возможностям её научно—технического потенциала, стыковаться с энергетическими, экономическими и ресурсными прогнозами, экологической обстановкой.

ПУТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРАТЕГИЧЕСКИХ СЦЕНАРИЕВ БУДУЩЕГО РАЗВИТИЯ.

1.Натурфилософская основа стратегических сценариев развития.

В последние 20 лет наблюдается существенный прогресс в обеспечении комфортности существования человеческого общества. Изменяются транспортная и бытовая техника, компьютеризация, технические и технологические направления, нанотехнологии, всемирная сеть Интернета.

Жизнедеятельность человека, его связь со средой обитания, материальное и энергетическое потребление, объективно неизменно и, видимо, сохранится в будущем. Это коррелируется с высказываниями замечательного ученого Макса К. Э. Л. Планка (1858—1947) о том, что *«не следует думать, что даже в самой точной из всех естественных наук можно продвигаться вперед без всякого мирозерцания»* [11].

Высказанная В.И.Вернадским в труде «Научная мысль как планетарное явление» [19] гипотеза о ноосфере, о влиянии совокупности мышления общества на геологические явления первоначально осталась без достойного внимания и обсуждения. Прошло около 50 лет, и гипотеза В.И.Вернадского стала основой серьезного научного направления — рассмотрения нашей планеты (в совокупности с человеческим обществом) как единого разумного организма, в состав которого входит атмосфера, вода, флора и фауна.

Наблюдаемые «болезни» Земли — результат техногенной деятельности человечества, нарушившей «жизнедеятельность организма» планеты.

Здесь уместно привести высказывание выдающегося ученого современности академика Н.Н.Семенова: *«Явления природы, как правило, комплексны. Они ничего не знают о том, как мы поделили наши знания на науки... Только всестороннее рассмотрение явлений с точки зрения физики, химии, механики, а иногда и биологии позволяют распознать их сущность и применить на практике»*

Исходя из принципа М. Планка, будущее развития ОВТ невозможно рассматривать в отрыве от общих, «философских» основ существования человеческого общества, от «глобальных» вызовов, стоящих перед человечеством в настоящее время. В последнее десятилетие эти глобальные вызовы превратились в неподъемную проблемную «глыбу», которая может свести на нет существование на планете человечества.

1.1.Использование стратегического сценария развития. Как пример «стратегической» деятельности фирмы «Карл Мунгерс АБ» (80 чел отдела концепции из 200 исследователей в центре фирмы г. Соллентуна [15]), можно привести разработку ими стратегии захвата рынка сбыта вращающимся регенеративными теплоутилизаторами ВРТ «Red rotor» (Красный ротор), способным выдерживать

температуры воздуха, в том числе повышенной запыленности, от 200°С (постоянно) до 800°С. В то время известные в мире утилизаторы действовали при температурах чистого воздуха до 80°С. Комплекс работ от разработки концепции до начала рекламирования ВРТ занял у фирмы восемь лет, но сейчас она единственный в мире его производитель со всеми вытекающими из этого преимуществами.

1.2. Пренебрежение стратегическим сценарием. Отсутствие стратегического сценария может дать непредсказуемый, зачастую отрицательный эффект. В 1969—1970 гг. появились сообщения о разрушающемся озоновом слое Земли, по сути, первый предтеча глобального кризиса, способного привести к непредсказуемым последствиям. Одним из разрушителей защитного слоя Земли определено действие на него паров хладагентов (содержащих острый хлор) автономных кондиционеров, холодильных машин, различных пропеллентов и т.д.

Невзирая на это, в СССР был проведен комплекс работ, и в 1976г введены в действие Бакинский завод бытовых кондиционеров и Краматорский завод «Кондиционер». В продукции этих заводов (кондиционеры БК-1500, БК-2500, «Донбасс») были заложены компрессорные холодильные устройства с хладагентом Х22, содержащим острый хлор. Годовое использование фреона превышало 500 тонн.

С подписанием Монреальской декларации в 1978 г., по которой все страны должны исключить применение хлорсодержащих компонентов, снятию с производства в СССР подлежала группа кондиционеров с ежегодным выпуском более 450 тыс. шт. Для выполнения международных обязательств объем финансирования был соизмерим с первоначальными затратами на организацию производства. Отсутствие стратегического сценария привело почти к двойной стоимости решения проблемы бытовых кондиционеров.

2. Формирование цели.

Определение и обоснование цели является основой как тактических, так и стратегических прогнозов будущего развития ОВТ.

В целевых функциях прогнозов развития оборудования и систем ОВТ определение позитивной цели следует осуществлять на основе, объективных законов действительности, реальных тенденций развития общества, возможностей его научно—технического потенциала.

А именно:

—**цель должна быть подчинена генеральной задаче** — обеспечение условий всесторонней комфортности жизнедеятельности человека, в нашем случае с помощью ОВТ;

—**цель должна быть корректна и реальна**, не иметь альтернативного толкования, соответствовать достижениям научно-технического прогресса, перспективным исследованиям и разработкам;

—**цель должна иметь срок реализации** (конкретный или перспективный).

Любая цель, как бы ее красиво не излагали, если она не имеет реализации, без сроков исполнения, без оценки ресурсов и финансирования, превращается в «светлое будущее», в мечту.

С другой стороны достигнутая мечта — это не мечта, а хорошо обоснованный план действий, осуществленный к определенному сроку.

3. Метод многофакторной целевой функции.

Техническая задача формируется на основе задаваемой цели. Постановка цели возникает или волевым образом, или в результате появления новой идеи, изобретения, использования нового физического эффекта, открытия, во многом цель формируется социальным заказом общества.

Реализация цели зависит от выполнения ряда условий или факторов, имеющих различную значимость, корректность и, в свою очередь, зависящая от каких-то факторов «пониженного» ранга.

На рис.1 приведена графическая интерпретация условной иерархии комплекса факторов, убывающих по важности характеристик, влияющих на конечный результат решения поставленной цели.



Рис.1. Иерархия факторов построения целевой функции

Fig.1. Hierarchy of the building factors of the aim functions

В общем представлении функция цели характерна для любой деятельности человека и всегда присутствует в любой жизненной ситуации, зачастую не формализуется им и не определяется. Это иногда приводит к сложностям в реализации цели, к частичности достижения результатов или к ее невыполнению. В общем виде это выражается комплексом многочисленных факторов, влияющих на реализацию цели, а именно:

Стратегическими — фактором (ГФ), (ДФ), отчасти определяющим фактором (ОФ);

Тактическими — зависимым фактором (ЗФ); единичным (ЕФ).

Каждый из факторов может в определенных условиях стать основой реализации конкретной цели.

$$Ц=f(ГФ); Ц=f(ДФ); Ц=f(ОФ); Ц=f(ЗФ); Ц= f(ЕФ)$$

Их взаимосвязь можно представить в виде:

$$\Pi = f(\Gamma\Phi) = f(\Sigma^{пд}\Delta\Phi) = f(\Sigma^{по}\Theta\Phi) = f(\Sigma^{пз}\Phi) = f(\Sigma^{пс}\Phi) = f(\Sigma^{пс}\Phi)$$

где n – количество факторов в одноименной группе.

Условно принято равенство групп факторов, хотя для различных устройств ОВТ их связь определяется сложными зависимостями кодирования значимости в рассматриваемой конкретной системе.

В практической деятельности решения технических задач (особенно многовекторных) значимость факторов на определенных периодах в общей иерархии может быть различна. Например, единичный фактор ЕФ может иметь весомую значимость вплоть до уровня генерального фактора ГФ (*стакан воды вылитый на платье королевы решил судьбу Англии*).

3.1. Кодирование факторов целевой функции.

Для каждого уровня поставленной цели факторы целевой функции имеют различную значимость и влияние на комплекс остальных факторов.

При любом развитии человеческого общества эта дифференциация конкретных систем ОВТ, видимо, будет сохраняться, так как и в будущем среда обитания человека чисто утилитарным.

В табл.1 приведены условные коды значимости и взаимосвязи иерархии общих и последующих (определяющих, зависимых и единичных) направлений стратегических прогнозов развития ОВТ

Таблица 1. Кодирование значимости и взаимосвязи факторов целевой функции прогнозирования развития ОВТ

Table 1. Encodeness of the significance and interconnection of the aim function factors of the developing forecasting of HVT

Фактор	Код	Значимость
1. Глобальные факторы развития человеческого общества, влияющие на формирование ОВТ		
Демографическая обстановка	ГФ 1.1	0,9... 1,0
1.1 Рост народонаселения		
1.2. Урбанизация планеты	ДФ 1.2	0,64... 0,8
1.3. Концентрация производства	ОФ 1.3	0,51... 0,7
1.4. Концентрация жилья	ЗФ 1.4	0,5... 0,61
1.5. Социальная структура общества	ВФ 1.5	0,25... 0,3
2. Факторы, обеспечивающие жизнедеятельность человеческого общества с помощью оборудования и систем ОВТ		
2.1. Обеспечение физического существования человека— условия комфорта	ГФ 2.1	0,89... 0,9
2.1.1. Коллективные средства защиты человека от	ГФ2.1.1	0,85... 0,9

воздействия окружающей среды (здания и сооружения различного назначения)		
3. Отопительная— вентиляционная техника	ГФ 3.	0,75... 0,9
3.1. «Идеальная» теплозащита объекта	ГФ3.1.	0,8... 0,85
3.2. «Идеальная» система отопления объекта	ГФ3. 2	0,7... 0,8
3.3. «Идеальный энергоноситель»	ГФ3. 3.	0,7... 0,9
3.4. «Идеальная» система вентиляции объекта	ГФ3.4	0,4... 0,7
3.5. «Идеальная» система кондиционирования воздуха	ГФ3.5	0,2... 0,5

Примечания к табл.1. В перечень не вошли: из факторов, обеспечивающих физическое существование человека, — производство продуктов питания; из факторов обеспечивающих эффективную жизнедеятельность человеческого общества (защита от окружающей среды), — индивидуальные средства защиты человека и кабинная техника (транспорт), как не вполне соответствующие нашей теме. По этой же причине в табл.1 не включены устройства и средства, обеспечивающие духовные потребности людей.

Разбег величин факторов по табл.1 вызван различием значимости объектов, обслуживаемых системами ОВТ и их многообразием:

— для отопления — от примитивных печных систем в домах сельской местности до индивидуальных регулируемых систем в элитных городских жилых домах и систем воздушного отопления в производственных зданиях;

— для вентиляции — от естественного проветривания помещений жилых и общественных зданий до централизованных автоматизированных приточно—вытяжных систем производственных зданий, устройств душирования рабочих мест и т.д.;

— для кондиционирования воздуха — от систем кондиционирования воздуха жилых помещений сезонного действия до круглогодичных прецизионных систем кондиционирования воздуха производств «белоснежной технологии (нанотехнологии)», бокс — скафандров и т.д.

4. Генеральная иерархия программобразующих факторов.

На рис.2 приведена генеральная иерархия программобразующих (генеральных, диктующих и определяющих) факторов, влияющих на развитие и обеспечение жизнедеятельности человеческого общества.

Построение генеральной иерархии завершается нахождением места в ней нашей отопительно-вентиляционной отрасли, применение которой характерно для всех отраслей человеческой деятель-

ности (ОВТ кроме жилых, общественных и промышленных сооружений применяются также для зданий и устройств агропромышленного комплекса, объектов духовной направленности— телецентры, театры, культовых сооружений, транспорта и т.д.).

Тенденции и закономерности взаимосвязей между факторами иерархии по рис.2 — объективная основа представления о путях будущего развития технических направлений — в нашем случае

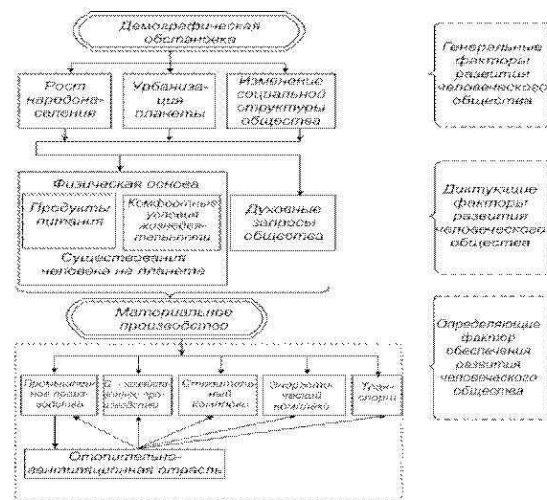


Рис. 2. Генеральная иерархия программобразующих факторов развития человеческого общества и роль в ней отопительно-вентиляционной техники

Fig. 2. The general hierarchy of programming factors of human society developing and its role in heating—ventilator technology

В иерархию не включены такие направления как космонавтика, исследования дальних миров и микромира и т.д., которые условно относим к духовным потребностям человека, а также производство и использование различного рода вооружений, которое, является антигуманным и со временем должно исчезнуть из нашей жизни.

5. Место отопительно-вентиляционной техники в балансе распределения общего энергопродукта страны.

В табл. 2 представлен обзор энергопотребления ОВТ (за последние 30 лет) странами Европы, США, а также Украины.

Таблица 2. Обзор энергетической значимости систем отопления (О), вентиляции (В), кондиционирования воздуха (КВ)

Table 2. Observation of energetic significance of the heating systems (H), ventilators (V) and air conditioning

Страна	Год	Годовой расход энергии на О, В и КВ в общем балансе страны
США	1977	О гражданских зданий потребляло: в 1960 г. - 18,3%, в 1973 г. - 17,8%; КВ: в 1960 г. - 1,6%, в 1973 г. - 3,2%; холодоснабжение: в 1960 г. - 2,0%, в

	1980	1973 г. - 2,2%. О жилых и коммерческих зданий ежедневно потребляло 477 тыс. м ³ нефти и 255 тыс. м ³ газа, или 37% потребности страны в энергии
Австрия	1980	Около 40% конечной энергии страны приходилось на О.
Англия	1976	29% энергии использовалось в жилье, в т.ч. 86% поступало на О и горячее водоснабжение (ГВ)
Венгрия	1981	Энергопотребление О, В и КВ оценивалось в 29,2% общего потребления в стране
Франция	1980	Энергопотребление жилищно-коммунального хозяйства составляло 631 млн. Гкал/год, (40% потребления энергии в стране). На О и ГВ шло 490 млн. Гкал/год
Германия	1980	46% энергии расходовалось для жилья, в т.ч. 80% на О. В ГДР 35% полезной энергии расходовалось на О.
	1986	В ФРГ 34% энергии использовалось для целей систем ОВ
Швейцария	1987	О потребляло 1/3 всей энергии страны. О и КВ потребляло 2 млрд. кВт ч.
ЕЭС	1996	40...50% общего потребления энергии шло на системы О и В зданий
СССР	1989	Парк систем КВ и В потреблял 17,8...16,2% электроэнергии, производимой в стране. ОВ и КВ промышленных зданий потребляли 30% производимой в стране теплоты.
Украина	2003	В жилищно-коммунальном комплексе расходовалось 25% топливно-энергетических ресурсов (75 млн. т.у.т.), в том числе: О — 79,7%, В — 1,2%, ГВ 19,1%

Усредненные значения по таб.2, можно показать, что энергопотребление ОВТ для развитых стран находится на уровне 30 – 40% (и более) от годового потребления энергоресурсов страны.

После распада СССР из статистики исчезли данные по производимым в Украине отдельным видам оборудования и по импортным поставкам ОВТ. По данным Гринписа Украины расход энергии в жилищно-коммунальном комплексе (1995 г.) составил 50% от общего потребления в стране [19].

6. Тезаурус инцидентов глобальных вызовов перед человечеством и роль ОВТ в преодолении негативных ситуаций.

Системный подход к прогнозированию должен быть эвристичным, то есть не только фиксировать достоинства и недостатки объекта изысканий, но и предугадывать направления его развития на базе новых физических эффектов, перспективных технологий, материаловедения и т.д.

Из тезауруса современных негативных инцидентов [17] рассмотрим некоторые угрожающие обстановки, требующие немедленного решения, в том числе с помощью ОВТ:

—озонная опасность— исключение из конструкции кондиционеров, тепловых насосов, холодильных машин и др. хладагентов, содержащих острый хлор(фактор ГФ);

—тепловое и газовое загрязнение —переход на энергоносители не связанные с углеводородной энергетикой, т.е. использующие различные виды энергии солнца не требующие использования воздуха для горения(фактор ГФ);

—Дефицит воды — исключение воды из контуров отопительных и вентиляционных систем, переход с водяного на воздушное охлаждение в конструкциях автономных кондиционеров (фактор ГФ).

Совместное рассмотрение взаимодействия «Обстановка — оборудование ОВТ» показывает, возможные пути снижения или ликвидация «кризиса» за счет технического или режимного решения.

7.Общий принцип «идеальности» стратегического решения.

В любой цели должен быть установлен предел достижения, который решается существующим комплексом научно—технического потенциала.

Под условным термином «идеальный» для технического объекта (оборудования или системы) понимаем показатель назначения, превышающий существующий, который можно достигнуть в перспективе при сохранении принципов корректности.

На каждом этапе развития ОВТ существовали свои представления об «идеальности» технических достижений к текущему моменту. Первым нагревательным аппаратом (после костра) являлась древесноугольная жаровня, устанавливаемая в отапливаемом помещении. Этот отопительный аппарат в то время был «идеальным», по словам оды К. Горация(65 до н.э.—8 до н.э.), давал возможность «без слез проводить вечера у домашнего очага».

Шло время и каждое новое устройство, лучше предыдущего, могло считаться на тот момент «идеальным».

В девятнадцатом столетии технические устройства получают первые технические характеристики, прообраз нынешних показателей назначения, по которым возможно их сравнение. Как пример приведено описание [20], лучшего к 1900г. радиального вентилятора фирмы Стюртеванта, корпус которого был выполнен (как новинка) из чугуна (?). В [18] описывается лучший (1914г.) воздушный отопительный агрегат английской фирмы «Стандарт Почин», теплообменный аппарат которого состоял из чугунных радиаторов по типу отопительных приборов центрального отопления, применявшихся до 90—х годов прошлого столетия.

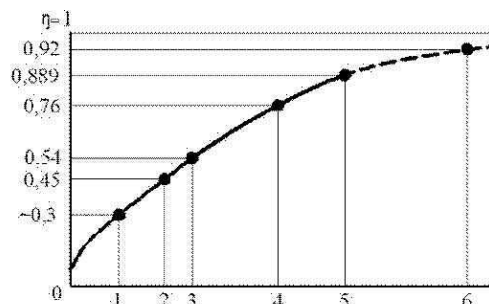
Как правило, предельность достижения конкретного показателя назначения не устанавливалась. Предельный показатель, для текущего момента может со временем стать устарелой величиной и нужно будет устанавливать значения новой «идеальности»: для текущего момента будет введена «идеальность» —1 порядка, далее «идеальность» — 2 и т.д. или определять по годам временного периода стратегии, как: «идеальность —2025года», «идеальность —2050 года» и т.д.

Этот процесс, видимо, будет постоянным —мы применили тезис «идеальность» как реальный предел будущего развития.

На рис.3. приведена графически—сглаженная интерпретация «идеальности» разработки радиальных вентиляторов низкого давления (с лопатками загнутыми назад). точки: 0—естественное устройство вентиляции;1— первый в мире радиальный вентилятор А.В.Саблукова (КПД 0,25...0,3[13]); 2 — вентилятор Шенгейдера (КПД 0,45[20]); 3— вентилятор ВРН (КПД 0,54); 4—вентилятор Ц.4—70 (КПД 0,76); 5—вентилятор В.Ц4—75 (КПД—0,889) [4;]; 6—теоретически возможный «идеальный» вентилятор (КПД —0,92).

Рисунок 3. Изменение представления об «идеальности» радиальных вентиляторов низкого давления по определяющему параметру — максимальному КПД за период 1832—1982гг. 0— естественное устройство вентиляции

Fig. 3. The changing of “ideality” idea of the low pressure radial ventilators to the determining parameter to the maximum efficiency for the period from 1832—1982 years.0— natural ventilator arranging



Изменение «идеальности» за сто пятьдесят лет показывает, что значения КПД асимптотично стремится достигнуть предельного значения, которое для этого класса вентиляторов теоретически не превышает 0,92 (вывод акад. Г.Ф.Проскуры для нагнетателей центробежного типа при «идеальном» изготовлении, полированными внутренними поверхностями и т.д.).

На рис.4. прослеживается изменение «идеальности» теплозащиты зданий (изменения коэффициента теплопередачи наружных стен) за последние 100 лет: «идеальность 1» — характерна для строительства зданий в 60—е годы XX столетия, «идеальность 2» — современные требования норм Украины.

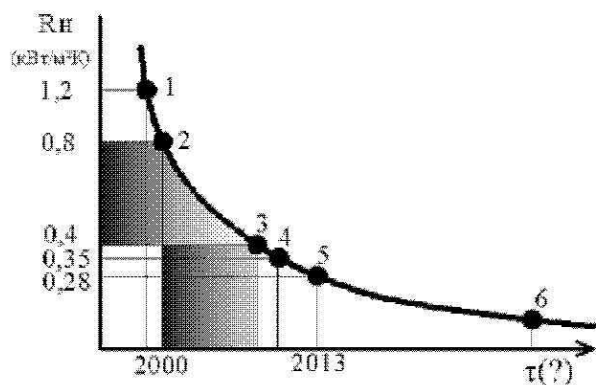


Рис. 4. Формирование представления об «идеальной» теплозащиты жилых зданий (на примере теплозащиты наружных стен — R_n)

Fig. 4. Formation of the “ideality” idea of the dwelling houses heat—protection(according to the example of the heat—protection of outward walls— R_n .)

Если принять эти требования для решения теплозащиты нового строительства, то уже сегодня будем отставать от «маяка» теплозащиты, которую в нашей стране считают Данию — «идеальность 3» и показатели Финляндии — «идеальность 4». Последующая «идеальность 5» (точка 6 на рис.4.) видимо это предел, который не скоро наступит.

Принцип «идеальности» может применяться и для остальных формаций, нашей жизни обозначая кроки решения проблем будущего.

8.Жизненный цикл технического устройства.

На основании известного тезиса Ф.Энгельса автором [18;19] предложена гипотеза о жизненных циклах (условно от «рождения» до «смерти») для человека, коллектива, государства и даже планеты.

На рис.5. приведены модификации жизненного цикла технических видов оборудования или систем, в частности определение возможных путей выхода из «застоя», снижения или нивелирования их техногенности и дальнейшего эффективного развития.

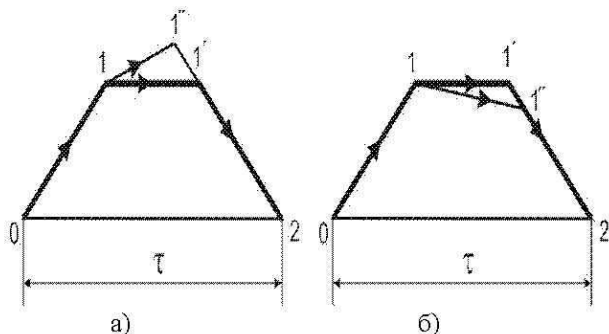


Рис. 5. Этапы формирования эволюционного развития технических систем: а) улучшение достигнутого (предельного) уровня развития и переход на более высокие показатели назначения(1-1''); б)

ухудшение (достигнутого) уровня развития и формирование кризисной ситуации(1-1'')

Fig. 5. The stages of the evolutionary development formation of the technological systems: а) the improvement of the attained level(maximum) of the development and the step to the more high indicators of the appointment(1-1''); б) worsening(maximum) level of the development and formation of the crisis situation(1—1'')

Возможны некоторые варианты развития технических устройств.

а). По принятому принципу «идеальности» развития показателей назначения технических систем точка 0— этап прошлой «идеальности—1», точка 1—достигнутый предел в определяющем параметре назначения нового устройства, современная «идеальность—2»; вектор 1-1'— консервация определяющего показателя, «застой»; точка 1''— будущий, новый предел показателя, «идеальность —3».

б). Достигнутый предел показателя,— точка 1 за период использования теряет свое преимущество и по векторам 1-1'и 1—1'' подлежит замене на новое устройство, то есть нового предела «идеальности».

Период консервации 1-1' является активным «существованием» объекта, после которого возникает «упадок и смерть» (точка 2), происходит снятие с производства морально устарелого оборудования, низкоэффективных систем и замена их на новые решения т.д.

Исследования и разработки по ОВТ сегодня решают частные задачи (единичные — факторы, типа ЕФ), подтверждая состояние — линии «асимптотического развития — застоя».

Срок службы технических устройств — важнейший вопрос, ответ на который дает представление о будущей производственной программе ОВТ.

Срок службы устройств ОВТ, как правило, определяются априори разработчики или производители без должной проработанности и обоснованности. Определено, что оптимально срок службы должен определяться по изменению показателей назначения, в первую очередь по потреблению энергии, при этом если стоимость ремонтов начинает превышать первоначальную стоимость устройства — замена необходима.

Сложнее с установлением оптимального срока службы систем с низкой мобильностью, особенно объектов жилья (централизованные системы отопления). Такие же сложности возникают в определение оптимального срока службы отопительно — вентиляционной техники бытового назначения. Уже длительное время в американских журналах типа «ASHRAE» реклама нового кондиционера сопровождается назойливым вопросом «Неужели в Вашем доме до сих пор бытовой кондиционер двухлетней давности?»

9. Принцип соответствия.

Для успешной реализации стратегических сценариев должен присутствовать принцип соответствия. Смысл этого принципа в том, что цель (Ц) стратегической задачи (типа ГФ) возможно реализовать за определенный временной период (Т) если она минимально соответствует:

— «интересам» (И) человеческого общества планеты, региона, страны или коллектива;

— подготовленности научного, технического, технологического, ресурсного и др. составляющих потенциала (П) общества;

— уровню научного, культурного, морального и др. составляющих общественного и личного сознания (С);

Предложенные по законам логистики составляющие принципа соответствия могут быть укрупненно, представлены в виде функционала генеральной совокупности

$$Ц = f\{И+П+С\} + Т$$

Функциональный комплекс значений, составляющих (Ц) может иметь множество трактовок:

«**Интерес (И)**» — условное обозначение возникшей кризисной ситуации, решение которой становится настоятельной необходимостью для человечества (экологический кризис), государства (энергетическая зависимость) или даже для отдельной личности (тяжелая болезнь):

$$\Sigma И = И_1 + И_2 + \dots + И_i;$$

«**Потенциал (П)**» — условное обозначение комплекса материальных возможностей человека или отдельных его субъектов:

$$\Sigma П = П_1 + П_2 + \dots + П_i;$$

«**Сознание (С)**» — условное обозначение комплекса позитивных аналитических возможностей общества и его коллективного разума:

$$\Sigma С = С_1 + С_2 + \dots + С_i;$$

Для отдельного индивидуума (человека) решение личностной стратегической или тактической задачи должно соответствовать его возможностям (сознанию, финансовому, материальному и др. его потенциала).

Каждый элемент функционального комплекса может иметь сложные взаимозависимости: пара составляющих кризисной ситуации (И₁, И₂) может войти в множество ΣП и при этом отторгаться множеством ΣС и т.д..

В нашем случае имеем дело с принципом соответствия функции цели суммы множеств типа N (A U B), типа N [A U (B U D)] или даже типа

$$N [(A_1 \dots A_i) U (B_1 \dots B_j) U (D_1 \dots D_k)]$$

Объем настоящей работы исключает подробное рассмотрение математического аппарата вероятностной оценки предложенного принципа соответствия. Отметим, что при конкретном составлении стратегической программы развития технического направления или исключения кризисной ситуации оценку дополнительно осуществляют по известному

критерию согласия (соответствия) А.Н. Колмогорова или по более «строгому» критерию Пирсона.

Во всех случаях должны отсутствовать (или быть сведены к минимуму) антагонистические противоречия или противоборства между составляющими принципа соответствия. Только в этом случае решение поставленной задачи может иметь успешную реализацию.

Можно привести множество примеров, когда превосходные идеи или не принимались, или их реализация откладывалась на долгие годы (Т) из — за не восприятия обществом этих предложений.

Например, камера увлажнения (прообраз камеры орошения ОКС-3 центральных кондиционеров КТЦЗ) Леонардо да Винчи (1500г.) зашифрованная в его «Атлантическом кодексе», востребована в начале XX столетия. Эта идея не оказало влияния на развитие ОВТ в течение многих столетий, не соответствовала уровню научно—технического потенциала и общественному сознанию того времени имела чисто исторический интерес [18]. Первый патент на эту камеру («Универсальный разбрызгиватель») получен в 1906г (Т=400 лет—автор В. Кэррьер).

Интересно, что прототипом современных космических ракет была «конструкция» поляка К. Симиновича, описанная им в 1650г. [6], идея ждала к себе интерес (принципа соответствия) почти Т=300 лет (до Циолковского).

Более близкие к нам примеры:

— в 1939г. в Москве протяженность линий метрополитена была почти в три раза больше протяженности сетей централизованного теплоснабжения городских районов (отставание на Т=50 лет);

— с начала прошлого столетия началось практическое использование силы ветра, хотя ветряные мельницы известны с незапамятных времен (мельницы Дон—Кихота Т>100лет);

— только в последние Т=30—40 лет мировой энергокризис обусловил проявление интереса к использованию в мелких объектах солнечных коллекторов для получения горячей воды и электроэнергии, утилизаторов и тепловых насосов в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха.

Эти примеры показывают, что, как бы ни была новой и полезной идея, для её внедрения должны быть созданы научно—технические условия соответствия её восприятия и реализации обществом.

9. Соответствие стратегического сценария мировому техническому уровню (МТУ).

Базироваться на достижение максимальных (идеальных) показателей новых разработок позволяет определение и дальнейшее сравнение с уровнем достигнутым в мировой ОВТ.

В общем виде семейство кривых обрабатываемых параметров оборудования выразится как:

$$П = x:(a+bx)$$

где Π — определяющий параметр (показатель назначения) образца; x — разноректорная величина, (+) для одного из параметров, например, характеризующая капитальные затраты; (—) для другого параметра показывающий уровень эксплуатационных показателей.

Для наглядности сравнения разрабатываемого перспективного образца оборудования предложена графическая интерпретация массива данных определения МТУ.

Графическое представление МТУ позволяет избежать длительных математических исчислений, быстро осуществлять оценку конкурентоспособности технического уровня разрабатываемой модели или зарубежного образца.

На рис. 6. приведена графическая интерпретация в общем виде построения МТУ (практически такое построение справедливо для всех видов кондиционеров и оборудования ОВТ) и условия его практического использования.

График состоит из двух частей, разделенных линией показателей назначения — определяющим параметром (в нашем случае это условно холодопроизводительность). В верхней части графика нанесены удельные показатели массы кондиционеров (P), в нижней части аналогично нанесены показатели потребляемой мощности (N). Для иллюстративности линии (P) — (N) графически сглажены. Как пример на график нанесены показатели МТУ из условно исследованного массива кондиционеров (точки 1...9), которые по-разному характеризуют уровень конкретного изделия.

На рис. 6. параметры МТУ условно отнесены к основному показателю назначения автономных кондиционеров — холодопроизводительности. Для иных типов оборудования ОВТ могут применяться другие основные показатели назначения, например, для теплообменников — это сопоставление значений теплопередачи по фактору $NTU = (F.K)$, для воздушных клапанов — по отличию регулирующих характеристик (μ) от идеальных, для воздушных фильтров — по значениям пропусков «стандартной» пыли (η) и т.д.

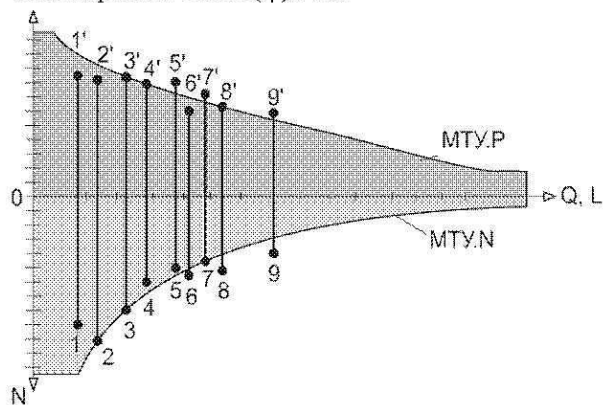


Рис. 6. Общее представление о мировом техническом уровне (МТУ) оборудования ОВТ по ге-

неральным показателям: N — потребляемая мощность (ГФ); P — масса.

Fig. 6. General idea about world technical level(WTL) of the HVT equipment according to the general indications— consuming power(CP);P— mass

Образец оборудования, показатели которого сравниваются с определенным МТУ, может (по рис.6.) попасть в одну из четырех групп:

- 1—1' — образец лучший по МТУ;
- 2—2';3—3';4—4'—находится на уровне МТУ;
- 5 - 5'; 6 - 6'; 7 - 7'; 8 - 8' — не соответствует МТУ по одному из генеральных показателей;
- 9 - 9' —худший образец

Образцы от 5 по 8 могут быть подвергнуты дальнейшему анализу по дополнительным показателям. К примеру, больший объем (и соответственно, масса) может быть связан с обеспечением высоких показателей эксплуатационной надежности. Излишние показатели потребляемой мощности, могут быть, связаны с дополнительными устройствами для работы кондиционера в режиме «теплового насоса» и т.д. Исходя из этого, для корректности определения МТУ должен использоваться довольно большой массив показателей зарубежных образцов для конкретного типа, режима, энергоносителя и т.д.

К примеру, МТУ автономных кондиционеров должен отдельно определяться для агрегатных и раздельно—агрегатных конструкций, с воздушным или водяным охлаждением конденсатора, с сезонным или круглогодичным режимом работы и т.д.

Подчеркнем, что показатели мирового технического уровня (МТУ), выраженные в математической форме, позволяют легко определить место рассматриваемого образца в ряду лучших кондиционеров мира. Предложенная основа МТУ эвристична и дает возможность оценить его изменение на ближайший период (τ_i) или сделать ретроспективный анализ, приняв $\Pi_{мтy_i} = \Pi_{мтy} \beta \tau_i^p$, где за начало отсчета принят год $\tau_i = 1$.

Описанный метод, кроме кондиционеров, неоднократно применен при разработке различных видов оборудования ОВТ. Как пример изложенного, в [18]приведены МТУ различных поколений воздушно-отопительных агрегатов 50-х – 90-х годов XX столетия, отнесенные к определяющему параметру – воздухопроизводительности, при использовании интерполяции показателей, как «вниз», так и «вверх».

ВЫВОДЫ

В статье в сжатом виде сформированы основные объективные тенденции и закономерности, которые следует учитывать при разработке не только общих государственных или отраслевых программ, но и сценариев развития отдельных направлений или к видов оборудования и систем ОВТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аше Б.М. 1934 Отопление и вентиляция т.1—Л.М.: Госстройиздат —720.
2. Велев П.С. 1985 Города будущего— М.; Стройиздат.- 160.
3. Гримитлин М.И. 1990 Состояние и пути повышения эффективности систем вентиляции зданий - АВОК; Журн. Асоц. инж. по отоплению, вентиляции, кондиционированию воздуха, теплоснабжению и строит. теплофизике..-№1.- 28—32.
4. EUROPEAN PATENT SPECIFICATIO. 0486691 B1 F04D 29/30 /Centrifugal fan./ Andreichenko A.F., Vasiliev, V.A., Gembarzhevsky M.Y., Solomakhova T.S., Schekin I.R. №91903340. 7. Date of publication 15.03.95. Bul.95/11. Referencs cited: DE—C.0952 547, GB—A.23 096, SU—A.1 337 555, FR—A.2 378 962, GB—A.464 449, US—A. 1 341 882.
5. Карпис Е.Е. 1979 Состояние и развитие систем вентиляции и кондиционирования воздуха на машиностроительных заводах в СССР и за рубежом. М.: Машиностроение.-47.
6. Кукушкин В.И. 2007 Воздушно—космический самолет. Время поиска и свершений /В.И.Кукушкин, А.С.Левенко—Д.; Проспект.-108.
7. Менделеев Д.И. 1949 Сочинения.—т.ХП, Л.;М.: Изд-во АН СССР.—1095.
8. Морозов Н.А. 1911 Взгляд в будущее. Эволюция элементов. /вып. XXV (дополн. статья.) в кн. «Эволюція міра»К.Штерне—М.:Т—ва «Мір».—128.
9. Морь Т. Утопія 1918 /пер. с латинского А.Г.Генкеля /Изд. Петроградского Совета рабочих и красноармейских депутатов.—164.
10. Наше общее будущее. Доклад Международной комиссии по окружающей среде и развитию (МКОСР - ООНМ.: Прогресс, 1989. – 376.
11. Планк М.К. 1926 Единство физической картины мира. в сб. Успехи физических наук, т.б. вып.3. /М.: Госнти.- 234.
12. Современный уровень и перспективы развития санитарной техники и производства санитарно—технического оборудования (кол. авторов, научн. редактор Л.И.Смирнов).-М.: Госстройиздат,—1962.-284.
13. Фигье Л. 1862 Важнейшее открытие и изобретение по части наук и промышленности—Санкт-Петербург. – 364.
14. Щекин И. Р. 1989 Значимость отопительно-вентиляционной техники для народного хозяйства страны // Известия вузов. Строительство и архитектура.— № 3. — 89 - 96.
15. Щекин И.Р. 1989 Стратегический сценарий развития кондиционирования. Фрагмент: Философские основы значимости кондиционеростроения. // Кондиционеростроение: сб. науч. тр. – Харьков.- вып. 18 - 64-72.
16. Щекин И.Р. 2003 Повышение энергетической эффективности вентиляционно — отопительных систем (принципы энергоаудита)– Харьков: «Форт». – 164.
17. Щекин И.Р. 2011 Стратегический сценарий развития технических систем. Фрагмент: тезаурус инцидентий развития отопительно-вентиляционной техники// Наук. вісник будівництва. – вып. 66. – Харків: ХДТУБА ХОТВ АБУ. – 456—459.
18. Щекин И.Р. 2011 Воздушное отопление (теория и техника на рубеже столетий). – Харьков: Бурун и К. – 288.
19. Щекин И. Р. 2013 Отопительно-вентиляционная техника Украины (тенденции и закономерности будущего развития) Харьков: Бурун и К.-303.
20. Энциклопедия промышленных знаний. Промышленность и техника т.1. История современной техники [сост. П.Ровальд, И.Фаульсвассер, Т.Шварце, Г.Шурц, перев. с немецк. В.В.Эвальда] — С. Петербург: Просвещение, 1903.-693.

TENDENCES and APPROPRIATENESS-ES of DEVETLOPING of FUTURE HTAT-INGh— VENTILATOR TECHNOLOGY.

Summary. Objective tendencies and appropriateness for building of the future development scenario of the heating—ventilator technology (HVT) has been found. In this article the basics of strategical scenario of development of HVT are briefly substantiated: the composition of the aim function and factors of its significance, the determination of technical structure improving of the objective period of its functioning, discount of the principles of correspondence of the new working out to the scientific—technological and production potential of the society, its correspondence to the world technological level.

Key words: tendencies, appropriatenesses, the function of the aim, ideality, vital cycle, the principal of correspondence, world technological level.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРА НА ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ

Наталья Куликова, Андрей Редько

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

Адрес: Украина, г. Харьков, ул. Сумская 40

E-mail: natikkulikova@rambler.ru

Аннотация. Выбор рациональной тепловой схемы теплоутилизатора является актуальной задачей энергосбережения при эксплуатации котельных агрегатов. В статье предлагается методика теплового расчета теплообменника на тепловых трубах с глубоким охлаждением продуктов сгорания котельной установки и конденсацией водяного пара. Описывается конструктивная схема теплообменника, выполненного из двух блоков, в которых тепловые трубы заполнены различными рабочими веществами. Приводятся результаты численного исследования распределений температуры и давлений теплоносителей (продуктов сгорания и нагреваемой воды) по длине противоточного теплообменника. Определена эффективность двухступенчатого теплоутилизатора.

Ключевые слова: теплоутилизатор; тепловые трубы; теплоноситель, котельная установка.

ВВЕДЕНИЕ.

В настоящее время около 35-40 % топливно-энергетических ресурсов Украины используется на теплоснабжение предприятий и населенных пунктов. Из них 70 % теплоты вырабатывается на централизованных и индивидуальных котельных. Затраты на отопление зданий составляют не менее 50 % от всех затрат жилищно - коммунального сектора.

Одним из перспективных направлений в энергосбережении является утилизация теплоты продуктов сгорания котельных установок за счет их охлаждения ниже точки росы ($50 \div 55 \text{ }^\circ\text{C}$) и выделения теплоты конденсации водяных паров. При этом в конденсате будут содержаться водорастворимые газы и взвешенные частицы. Поэтому глубокое охлаждение продуктов сгорания котельных агрегатов в конденсационном режиме обеспечивает не только повышение коэффициента использования топлива и повышения их экологической эффективности.

Потери теплоты с уходящими газами котельных установок достигают $5 \div 6 \%$. При номинальной мощности газо-мазутных котлов типа ДЕ уходящих газов за экономайзером при работе на газе составляет $140 - 160 \text{ }^\circ\text{C}$, а на мазуте от $170 - 190 \text{ }^\circ\text{C}$.

В системах утилизации теплоты используются различные типы теплоутилизационных установок. Выбор типа и требуемой производительности теплоутилизатора определяется не установленной мощностью котлоагрегата, а наличием потребителей утилизируемой теплоты: подогрев химически очищенной воды, подогрев дутьевого воздуха, система горячего водоснабжения, подогрев обратной сетевой воды, технологический нужды промышленного предприятия, подогрев воды для систем теплоснабжения тепличных и парниковых хозяйств и т.д.

Широко применяются контактные теплообменники, в которых происходит теплообмен между дымовыми газами и

охлаждающей их водой. Такие теплообменники при приемлемых габаритах, умеренном расходе металла на их изготовление и сравнительно невысоком расходе электроэнергии при эксплуатации, обеспечивают глубокое охлаждение дымовых газов до $40 - 45 \text{ }^\circ\text{C}$ и конденсацию $60 - 90 \%$ водяных паров, содержащихся в газе.

В контактных теплообменниках нагрев воды возможен только до температуры «мокрого термометра», которая составляет $50 \div 60 \text{ }^\circ\text{C}$ и зависит от влагосодержания дымовых газов и коэффициента избытка воздуха. С увеличением влагосодержания, парциальное давление водяных паров в дымовых газах растет, при этом растет и температура «мокрого термометра». Эффективность контактных теплообменников снижается с увеличением температуры воды (воздуха) и применение их рекомендуется при температуре воды на входе не выше $35 \text{ }^\circ\text{C}$.

Нагреваемая вода содержит свободную углекислоту в количестве до $0,008 - 0,1 \text{ г/м}^3$, что повышает ее коррозионную активность.

Применение конденсационных утилизаторов теплоты на отопительных котельных позволяет повысить КПД на $6 - 8 \%$, снизить себестоимость вырабатываемой тепловой энергии на $9 - 11 \%$.

Сравнение параметров контактных и поверхностных теплообменников показывают, что поверхностные аппараты характеризуются меньшими капитальными затратами, меньшим расходом электроэнергии. Себестоимость и срок окупаемости их значительно ниже.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ.

Основным видом вторичных энергоресурсов (ВЭР) в промышленности является теплота отходящих газов теплоэнергетических и технологических агрегатов [11].

Большие резервы экономии вторичных энергетических ресурсов в странах СНГ заключаются не только в утилизации

высокотемпературных газов, но и низкотемпературных (до 300 °С).

В Японии [14] разработана и реализована в промышленных условиях оригинальная конструкция теплообменника тепловой мощностью 75 МВт для утилизации теплоты отходящих газов после котла. При начальной температуре газа 370 °С удается нагреть воздух с 50 °С до 340 °С; температура отходящих газов снижается до 130 °С.

Промышленностью серийно выпускаются водяные экономайзеры типа ЭК-БМ1-1 и ЭК-БМ1-2 [12].

Табл. 1. Основные теплотехнические параметры
Table 1. The general thermotechnical characteristics

Показатель	ЭК-БМ1-1	ЭК-БМ1-2	АЭ-0,6
Теплопроизводительность, МВт	0,87	1,22	0,6
Температура Газов на входе, °С	140	140	140
Расход газов, кг/ч	3600	14400	10620
Расход нагреваемой воды, т/ч	8-12	30-40	20
Температура теплоносителей на выходе, °С			
Горячей воды	42-55	42-55	40-50
Уходящих газов	30-40	30-40	40-50
Аэродинамическое сопротивление, Па	300-500	300-500	300
Габариты, мм			
длина	1488	2443	2800
ширина	1028	2080	2150
высота	4500	5000	5570

КПД утилизатора определяется по формуле:

$$\eta_y = 0,99(1 - \frac{t''}{t'}) \quad (1)$$

где t' и t'' – температура газов на входе и на выходе из теплообменника.

Применение конденсационных теплообменников более эффективно для котлов малой мощности, чем установок с КТАНами [20].

Табл.2. Характеристики КТАНов

Tabl.2. KTANs characteristics

Характеристики КТАНов-утилизаторов КТАН – 1,5 УГ	
Теплопроизводительность, МВт	1,5
Расход газов, нм ³ /с	4,5
Температура нагреваемой воды, °С	
на входе	5
на выходе	50
Температура дымовых газов, °С	
на входе	140

на выходе	40
Поверхность теплообмена, м ²	52,4
Размеры, м	
длина	2,66
ширина	1,75
высота	4,16
Аэродинамическое сопротивление, Па	493

Институтами (ВЗПИ, Горьковским ГНИ Сантехпроект) разработаны конденсационные утилизаторы типа КСК и типа ТП-Т1РК.

Табл.3. Характеристики ТП-Т1РК
Tabl.3. The TP46-T1RK03 characteristics

Характеристики ТП46-Т1РК03	
Расход воздуха, тыс. м ³ /ч	16
Площадь теплообменной поверхности, м ²	68,0

Габариты, мм	
длина	1727
ширина	180
высота	1075

Теплообменники-утилизаторы мощностью 1,0 - 2,5 МВт (завод «Промгазашарат») обеспечивает нагрев дутьевого воздуха или воды системы ГВС [15]. Утилизатор изготовлен на базе термосифонов.

Табл.4. Характеристики утилизаторов:

Tabl.4. Utilizers characteristics

Тип	УГВ-1	УГВ-2	УГГ-1	УГГ-2
Мощность, кВт	42	110	42	110
Температура газов, °С				
На входе	210	210	210	210
На выходе	115	115	115	115
Δt теплоносителя, °С	18	13	110	115

Поверхностные утилизаторы (калориферы) установленные в газоходе создают значительное аэродинамическое сопротивление в газовом тракте, что увеличивает мощность дымососов. При этом характеризуется большой площадью поверхности теплообмена [6].

Разрабатываются аппараты с жидким промежуточным теплоносителем (КТАН) [20].

Эффективные компактные теплообменники-утилизаторы на оребренных термосифонах для паровых котлов малой мощности (паропроизводительностью 1 т/ч) разработаны в Киевском политехническом институте [2].

Схема простейшего утилизатора на тепловых трубах

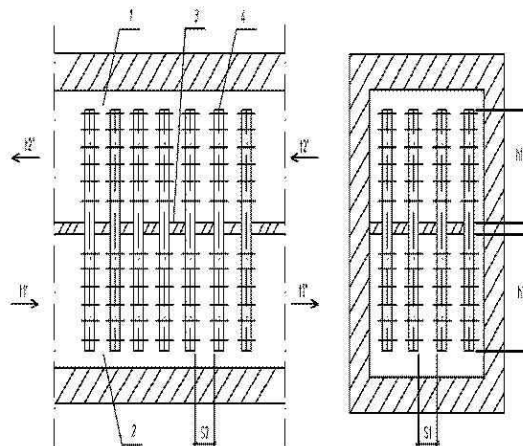


Рис.1. Схема простейшего теплоутилизатора на тепловых трубах (1,2 – газоходы; 3 – газоплотная перегородка; 4 – тепловая труба)

Fig. 1. The scheme of elementary heat utilizer at heat pipes (1,2 – gas flue; 3 – gas-tight partition; 4 – heat pipe)

Теплообменник состоит из двух газоходов 1и 2, разделенных газо-плотной перегородкой 3. В перегородке закреплены замкнутые теплопередающие элементы в виде тепловых труб 4 со свободными концами, размещенными в газоходах с «горячим» и «холодным» теплоносителями.

Внутри замкнутых элементов заключен промежуточный теплоноситель, с помощью которого теплота в испарительно-конденсационном цикле передается от «горячего» к «холодному» теплоносителю.

Охлаждение дымовых газов в конденсационном теплообменнике снижает влагосодержание на 70-80%, что не исключает возможности конденсации водяных паров в газоходах и дымовой трубе. Отсутствие надежных зависимостей, определяющих процесс изменения влагосодержания не позволяет принимать правильное решение эксплуатационным персоналом о возможности повышения технико-экономических параметров и надежности установки.

Термодинамические процессы при охлаждении продуктов сгорания и конденсации водяного пара показаны на I-d диаграмме [7].

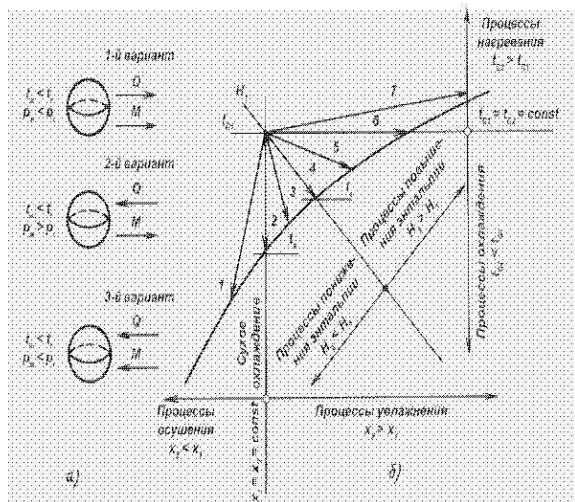


Рис.2. Основные процессы при контакте капель и газа: а - варианты направлений переноса теплоты и влаги; б - представление процессов на H-x диаграмме: 1 – охлаждение и осушка газа; 2 – сухое охлаждение газа; 3 – охлаждение и увлажнение с итоговым понижением температуры газа; 4 – охлаждение с увлажнением без изменения энтальпии; 5 – охлаждение с увлажнением и повышением энтальпии; 6 – изотермическое увлажнение; 7 – нагревание газа с увлажнением.

Fig.2. Main processes during gas and drop contact: a – direction variants of heat and moisture transfer; b – process presentation on H-x diagram: 1 – gas cooling and drying; 2 – dry gas cooling; 3 – cooling and moisturizing with the resulting gas temperature decrease; 4 – cooling with moisturizing without enthalpy change; 5 – cooling with enthalpy increase and change; 6 – isothermal increase; 7 – gas heating with moisturizing.

Значение коэффициента теплоотдачи от дымовых газов к оребренной поверхности определяется из уравнения [11]:

$$Nu_d = 4.55 Re K Pr, \quad (2)$$

где Nu , Re , K , Pr – соответственно число Нуссельта и критерии Рейнольдса, Прандтля и орошения:

$$(K = wD / \mu).$$

Критерий орошения позволяет оценить влияние плотности орошения W ($\text{кг}/\text{м}^2\text{ч}$) связанной со степенью охлаждения дымовых газов. Экспериментально установлено, что значение коэффициента теплопередачи в условиях конденсации водяных паров превышают значения K при сухом теплообмене для водяных экономайзеров ВТИ и УККБ соответственно в 1,5 и 1,8 раза при плотности орошения 3,19-4,03 $\text{кг}/\text{м}^2\text{ч}$ и скорости газов 1,89-3,78 м/с.

Приведенное количество выделяющего конденсата из продуктов сгорания при их охлаждении определяется по формуле:

$$\Delta g^{np} = [g_{cg}^{np} + g_{св}^{np} (\alpha_{yx} - 1)] (x'_{yx} - x''_{yx}), \quad (3)$$

где $g_{св}$ – приведенный теоретический расход сухого дутьевого воздуха, $g_{св} = 1,415$; $g_{сг}$ – приведенный теоретический расход сухих продуктов сгорания, $g_{сг} = 1,333$; α_{yx} – коэффициент избытка воздуха перед теплоутилизатором; x'_{yx} , x''_{yx} – соответственно начальное влагосодержание продуктов сгорания на входе в теплоутилизатор и на выходе, $\text{кг}/\text{кг}$ с.г.

Приведенные характеристики определены по отношению к нижней теплоте сгорания Q_n^p , $\text{Мкал}/\text{м}^3$. Абсолютное количество конденсата определяется, как:

$$\Delta g = \Delta g^{np} Q_n^p, \quad (4)$$

Значения x'_{yx} , x''_{yx} определяются по формулам:

$$x'_{yx} = (0,13 + x_b \alpha_{yx}) / (\alpha_{yx} - 0,058),$$

$$x''_{yx} = \frac{0,0006382 + 0,004 \alpha_{yx} \exp(0,062 t_{yx}'')}{0,199 + \alpha_{yx}}$$

где x_b – влагосодержание дутьевого воздуха, $\text{кг}/\text{кг}$ с.в; t_{yx}'' – температура уходящих продуктов сгорания на выходе из теплоутилизатора, $^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, количество выделяемого конденсата зависит от влагосодержания дутьевого воздуха, коэффициента избытка воздуха и температуры продуктов сгорания на выходе из теплоутилизатора.

Интенсивность (плотность) орошения w ($\text{кг}/\text{м}^2\text{ч}$) определяется скоростью выпадения конденсата и площадью теплообменной поверхности.

Приведенный коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к наружной поверхности теплоутилизатора определяется по уравнению (2) с учетом плотности орошения конденсатом. Критериальное уравнение справедливо для конденсационного теплоутилизатора-калорифера типа $КС_k - 4-11-02$ ХЛЗ (изготовитель АО «Калориферный завод», г.Кострома).

Зависимость коэффициента теплопередачи от скорости продуктов сгорания и плотности орошения показана на рис. (3).

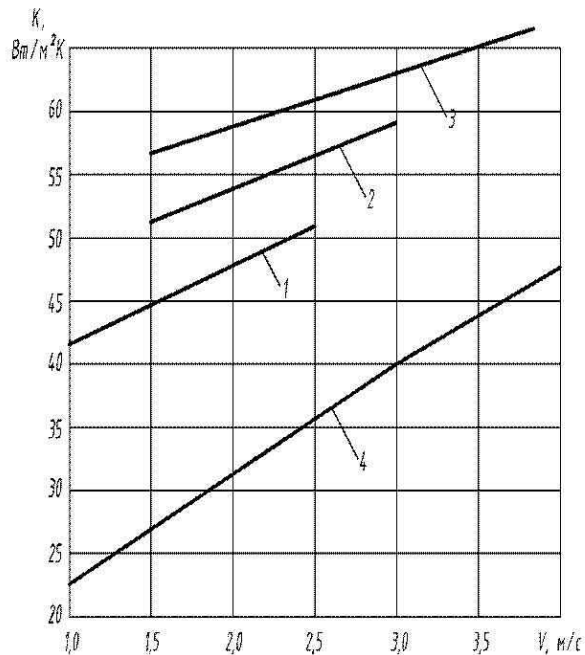


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопередачи $K_{\text{пл}}$ Вт/(м²К) от скорости газов V м/с и плотности орошения W (1 - $W=2,28 \div 3,57$; 2 - $W=2,83 \div 3,67$; 3 - $W=3,19 \div 4,03$; 4 - для воздуха («сухой» теплообмен))

Fig. 3. The plot of a heat transfer coefficient K W/m²K from gases speed V m/s and irrigation density W . (1 - $W=2,28 \div 3,57$; 2 - $W=2,83 \div 3,67$; 3 - $W=3,19 \div 4,03$; 4 - for air («dry» heat-exchange))

Поверхностные конденсационные теплоутилизаторы-экономайзеры широко применяются в Голландии, Франции, Германии, США, Канаде, Италии и других странах.

В России выпускаются биметаллические (сталь-алюминий) теплообменники (калориферы) – КС_к-4-11).

Коэффициент теплопередачи изменяется от 43,4 до 65,6 Вт/м²К при скорости продуктов сгорания 1,0÷4,0 м/с. Опытные значения коэффициента теплоотдачи составили 47,5÷77,0 Вт/м²К при плотности орошения 2,2÷4,0 кг/м²с.

При установке поверхностных теплоутилизаторов за котлами, уходящие газы охлаждаются и частично осушаются. Влажность газов снижается до значений 0,03÷0,006 кг/кг с.г., а точка росы до 30 – 40 °С, что является положительным фактором, т.к. предотвращается выпадение конденсата в дымовой трубе.

Поверхностные конденсационные теплоутилизаторы характеризуются коррозионными процессами, т.к. pH конденсата составляет 3÷5.

Для их изготовления применяют нержавеющую сталь, медь, алюминий, биметаллические трубы (сталь-алюминий), полимерные материалы, стекло и керамику.

Сравнительный анализ характеристик конденсационных котлов контактного и поверхностного типов приведен в [14; 16].

При эксплуатации котлов, при номинальной мощности коэффициент избытка воздуха составляет $\alpha_{\text{в}}$ в продуктах сгорания составляет 1,2 ÷ 1,3, а точка росы газов – 53 ÷ 55 °С. Поэтому для работы теплоутилизатора в конденсационном режиме необходимо, чтобы температура нагрева воды не превышала 50 °С. Средняя логарифмическая разность температур в теплообменнике составляет около 12 ÷ 15 °С.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель работы – разработка методики теплового расчета двухступенчатого теплоутилизатора на тепловых трубах при глубоком охлаждении продуктов сгорания с конденсацией водяного пара.

При тепловом расчете конденсационных теплоутилизаторов широко применяют позонный метод расчета [9, 13].

Продукты сгорания представляют собой парогазовую смесь содержащую инертные примеси (CO₂, N₂, H₂O, воздух и др.) с высоким содержанием ($\epsilon_r=0,83 \div 0,45$) [9]. Поэтому для расчета коэффициента массообмена можно использовать приближенную аналогию между теплообменом и массообменом. Плотность поперечного потока массы имеет значение $\rho < 0,1$ кг/м²с.

При определении коэффициента теплопередачи наиболее сложным является определение α_r , $\alpha_{\text{пл}}$ коэффициентов теплоотдачи от парогазовой смеси к поверхности пленки конденсата и от пленки конденсата к охлаждающей жидкости (поверхности).

Коэффициент теплоотдачи α_r определяется по известным зависимостям [17].

Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{пл}}$ для горизонтально расположенных пучков труб определяется по формуле:

$$\alpha_{\text{пл}} = c_w \alpha_n, \quad (5)$$

где c_w – коэффициент, учитывающий скорость движения парогазовой смеси; α_n – коэффициент теплоотдачи при конденсации медленно движущегося пара:

$$\alpha_n = 0,728 \sqrt{\frac{g \rho_k^2 \lambda_k^3 r}{\mu_k d \Delta t_{\text{nc}}}}, \quad (6)$$

где ρ_k , λ_k , μ_k – соответственно плотность, коэффициент теплопроводности, коэффициент динамической вязкости конденсата; d – диаметр трубы; $\Delta t_{\text{nc}} = t_{\text{zp}} - t_{\text{сг}}$ – температурный напор «пар-стенка», $\Delta t_{\text{nc}} \approx 2$ °С.

Коэффициент массоотдачи β может быть определен на основе аналогии между теплообменом и массообменом по известным зависимостям [2, 3, 4, 13] с использованием

зависимостей вида $\beta = \beta(\alpha_r)$ или критериальных уравнений.

В [17] приведено уравнение:

$$\beta = \frac{\alpha_z}{C_{рсм} P_{ср}} \cdot \frac{\mu_n}{\mu_{см}} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_d} \right)^{2/3}, \quad (7)$$

где $\mu_{см}$ – средняя молекулярная масса парогазовой смеси:

$$\mu_{см} = \mu_z \xi + \mu_n (1 - \xi), \quad (8)$$

Pr – тепловой критерий Прандтля; Pr_d – диффузионный критерий Прандтля; $P_{ср}$ – движущая сила массообмена, определяемая по формуле:

$$P_{ср} = \frac{P_n - P_{зп}}{\ln \frac{P - P_z}{P - P_n}}, \quad (9)$$

Плотность поперечного потока массы определяется по формуле:

$$g = \beta (P_n - P_{зп}), \quad (10)$$

Условный коэффициент теплоотдачи от парогазовой смеси к стенке поверхности теплообмена определяется по формуле:

$$\alpha_1 = \left\{ \frac{1}{\beta \left[r + c_k (g_{см}^{зх} - g_{см}^{хх}) \frac{P_n - P_{зп}}{g_{см} - t_{тп}} + \alpha_z \right]} + \frac{1}{\alpha_{нв}} \right\}^{-1} \quad (11)$$

Общий условный коэффициент теплопередачи от парогазовой смеси к нагреваемому теплоносителю определяется, как:

$$K = \frac{\psi}{\frac{1}{\alpha_x} + \sum R_i + \frac{1}{\alpha_g}}. \quad (12)$$

Опытами установлено, что гидродинамика пленки на вертикально оребренной или профильно-витой трубке существенно отличается от гидродинамики пленки на гладкой трубке. Угол отклонения траектории движения пленки от вертикального направления увеличивается, что лимитирует процесс теплопередачи.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

В данной работе предлагается методика теплового расчета двухступенчатого теплоутилизатора на тепловых трубах (термосифонах) с учетом конденсации водяного пара при глубоком охлаждении продуктов сгорания котельного агрегата.

Методика расчета предполагает позонный расчет параметров (температура, давление, мощность термосифонов, выпадение конденсата и т.д.) по длине теплообменника.

Схема движения теплоносителей следующая: вода – продольно-поперечное многоходовое движение; продукты сгорания – продольное

противоточное. Конструктивные особенности термосифонов: зона конденсации – гладкая; зона испарения – оребренная с поперечными ребрами, при этом длина зон термосифонов различная, $l_{и} > l_{к}$. Теплоутилизатор типа «газ-жидкость» предназначен для получения горячей воды с температурой $50 \div 55$ °С. Диаметр труб равен $32 \div 57$ мм, что обеспечивает выполнение ограничения по предельной плотности теплового потока в газоходе [2].

Коэффициент теплопередачи теплоутилизатора определяется по формуле:

$$K_i = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{вн1}} + \frac{1}{\alpha_{и}} + \sum \frac{\delta_{см}}{\lambda_{см}} + \frac{1}{\alpha_{к}} + \frac{1}{\alpha_{вн2}}}, \quad (13)$$

Где $\alpha_{вн1}$, $\alpha_{вн2}$ – коэффициенты теплообмена между теплоносителями (продукты сгорания, вода) и внешней поверхностью термосифона в зонах испарения и конденсации; $\alpha_{и}$, $\alpha_{к}$ – соответственно коэффициенты теплоотдачи в зоне испарения и конденсации; $\sum \delta_{см}/\lambda_{см}$ – термическое сопротивление стенок термосифонов.

Теплопроизводительность теплоутилизатора определяется по формуле:

$$Q = KF \Delta t, \quad (14)$$

Где F – площадь поверхности; Δt – средний температурный напор.

Коэффициенты теплоотдачи в различных зонах теплоутилизатора определяются по следующим зависимостям. Коэффициент внешнего теплообмена $\alpha_{вн2}$ в зоне конденсации между нагреваемой водой и внешней поверхностью трубы термосифона определяется по известным зависимостям при обтекании жидкостью пучков труб [2].

Коэффициент теплоотдачи в зоне конденсации определяли по зависимости [2].

Для снарядного режима:

$$\frac{Nu^*}{Pr^{0,54}} = 0,21 Fr^{*0,24}, \quad (15)$$

$$Nu^* = \frac{\alpha_k}{\lambda} \left[\frac{V'^2}{g(1 - S''/S')} \right], \quad (16)$$

$$Fr^* = \frac{W_0'^2 \cdot \rho'}{g \delta \rho}, \quad (17)$$

Коэффициент теплоотдачи в зоне испарения термосифона по зависимости [18]:

$$Nu = 0,0123 Re^{0,5} Pr^{0,35} Kp^{0,54} \left(\frac{d}{l_*} \right)^{0,17}, \quad (18)$$

Коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к внешней поверхности термосифона определяется по формуле:

$$\alpha_{вн} = \alpha_{ср} \frac{F_{ср} e \psi + F_{лр}}{F}, \quad (19)$$

Результаты численных расчетов следующие:

На рис.3 показано изменение мощности термосифонов по длине теплообменника

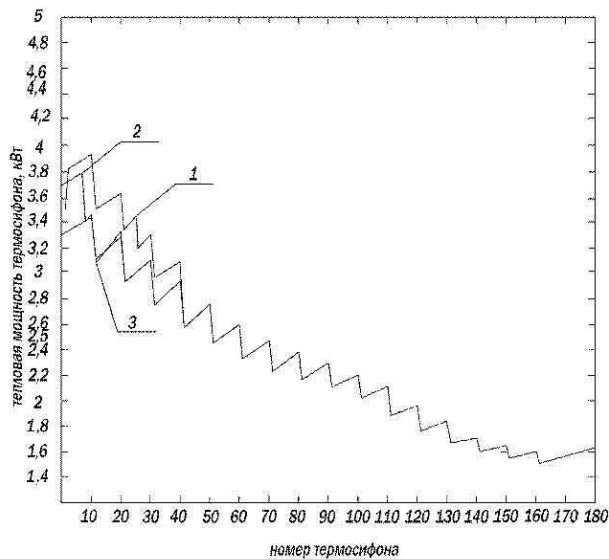


Рис. 4. Изменение тепловой мощности термосифона по длине теплообменника (1- до 27 термосифона теплоноситель вода , после изобутан; 2 – до 8 термосифона метанол, после 8 – изобутан; 3 – во всех термосифонах теплоноситель изобутан)

Fig. 4. Thermosyphon power change along heat-exchanger (1 - up to 27 water heat-carrier thermosyphon, after isobutane; 2 – up to 8 methanol thermosyphon, after – isobutene; 3 – isobutene is a heat-carrier in all thermosyphons)

На рис. 5 – изменение температуры теплоносителей по длине теплообменников при одноступенчатой и двухступенчатой схемах теплоутилизаторов.

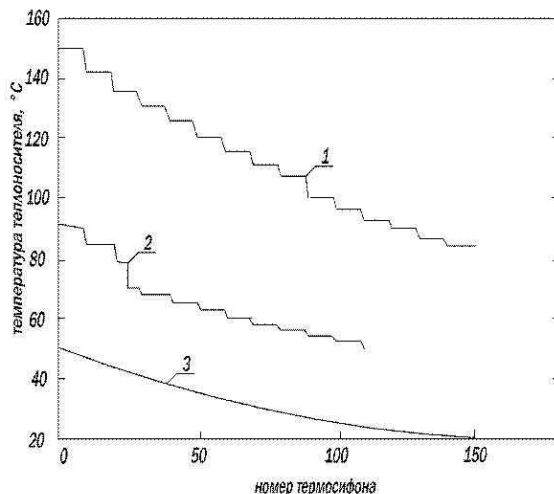


Рис.5. Изменение температуры теплоносителя по длине теплообменника (1 – температура уходящего газа на входе в теплообменник; 2 – температура воды в термосифоне; 3 – температура изобутана)

Fig.5. Heat-carrier temperature change along the heat-exchanger (1 – the outlet-gas temperature in the inlet of heat-exchanger; 2 – water temperature in the

thermosyphon; 3 – isobutene is a heat-carrier in all thermosyphons.

Показано, что выбор рабочего вещества для термосифонов позволяет обеспечить высокую эффективность теплоутилизаторов при глубоком охлаждении продуктов сгорания котельной установки.

ВЫВОДЫ

Результаты численного исследования показывают возможность повышения эффективности теплоутилизаторов выполненных по двухступенчатой схеме с различными теплоносителями в термосифонах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аронов И.З., 1978. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа. – Л.: Наука. – 220.
2. Безродный М.К., Пиоро И.Л., Костюк Т.О., 2005. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика. – 2-е издание, дополненное и переработанное. – Киев: Факт. – 704.
3. Берман Л.Д. Об упрощенных эмпирических зависимостях для массообмена при конденсации пара из парогазовой смеси, 1960. Теплоэнергетика. – №8. – 74 – 78.
4. Берман Л.Д., Фукус С.Н., 1958. Массообмен в конденсаторах с горизонтальными трубами при содержании в паре воздуха. Теплоэнергетика. – №8. – 66 – 74.
5. Бобе С., Малышев Д.М., 1971. К расчету конденсации пара при поперечном обтекании труб парогазовой смесью. Теплоэнергетика. – №12. – 84 – 86.
6. Г.Д. Глубокая А.Д. Киосов, Авруцкий, 2011. Утилизация тепла уходящих газов котлов и его аккумулирования. Теплоэнергетика: Теор. и науч.-практи. журн. – №11. – 60 – 63.
7. Галустов В.С., 2003. Теплообменные процессы и аппараты с непосредственным контактом фаз в теплоэнергетике. Энергетика и менеджмент. – №4. – 120.
8. Л.Д. Богуславский, В.И. Ливчак, 1990. Энерго-сбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха: справочное пособие. – М.: Стройиздат, 1990. – 624.
9. Ефимов А.В., Гончаренко А.Л., Гончаренко Л.В., 2009. Совершенствование метода теплового расчета конденсационного теплоутилизационного аппарата поверхностного типа, установленного за котельной установкой. – Энергетика: экономика, технология, экология. – №1. – 64 – 73.
10. Исаченко В.П. Теплопередача. 1975. Учебник для вузов. Изд. 3-е перераб. и доп. М., «Энергия»; – 488.
11. Кудинов А.А., 2001. Энергосбережение в теплогенерирующих установках. – Ульяновск: УЛГТУ. – 139.

12. Методические рекомендации по проектированию контактно-экономайзерных установок в газифицированных котельных, 1985. К.: НИИСТ. – 96.

13. Навродская Р.А., 2001. Утилизация теплоты уходящих газов газопотребляющих котлов в поверхностных теплоутилизаторах конденсационного типа. – Автореф. Дис. канд. техн.наук. – К. – 20.

14. Oshima T., Mohtai T., Mochizuki M., Sugihara S. Laboratory evaluation of heat pipes for development of heat pipe type large gas air heater, 1987. Prep. 6th Int. Heat Pipe Conf. (Grenoble) . – 641 – 646.

15. Пенчев П., Юруков И., Милачков Х. Утилизация на отпадна топлина от хлебопекарни печи через теплообменник с топлинни тръби, 1987. Энергетика . – т.38. – №4. – 24 – 25.

16. Portrait L., 1985. M. Las calderas de condensacion. – Clima y ambiente. – №146. – 55 – 60.

17. Семенов В.П., 2008. Разработка методов интенсификации процессов теплообмена при конденсации пара в поверхностных и контактных теплообменниках. Автореф. дис. д-р техн. наук. – Екатеринбург. – 36.

18. Семена М.Г., Киселев Ю.Ф., 1978. Исследование процессов теплообмена в зоне теплоподвода двухфазных термосифонов на фреонах. 11, 113, 142, воде и этаноле. Инж.-физ. журн. – №2. – 211 – 217.

19. Суханов В.И. и др., 2001. Установки утилизации тепла и очистки дымовых газов паровых и водогрейных котлов. – М.: АКВА-ТЕРМ.

20. Теплообменники контактные с активной насадкой (КТАН) для котлов теплопроизводительностью 0,2 – 1,16 МВт, работающих на природном газе: Каталог. – Рига. – 40.

21. Фиалко Н.М., Гомон В.И., Навродская Р.А., Прокопов В.Г., Пресич Г.А. Особенности методики расчета поверхностных теплоутилизаторов конденсационного типа, 2000. Промышленная теплотехника . – №2. – 49 – 53.

22. Юдин В.Ф. Теплообмен поперечнооребранных труб. 1982. – Л.: Машиностроение. – 189.

Key words: heat-utilizer; heat-pipes; heat-carrier; boiler unit.

EFFICIENCY OF TWO-PHASE HEAT-EXCHANGER AT HEAT PIPES

Summary. The choice of rational heat-utilizer scheme is a very actual problem when using boiler units. This article proposes the heat computation technique of heat exchanger at heat pipes with deep combustion-product cooling in boilers and water steam condensation. In addition, the construction scheme of heat exchanger made with two units in which the heat pipes are filled with different working substance is described. The results of heat carrier temperature and pressure distribution (namely: combustion products and water being heated) according to counterflow - heat exchanger length are presented. The efficiency of two-phase heat-utilizer is determined.

ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ СТОЧНЫХ ВОД НА ЛОКАЛЬНЫХ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ ОЧИСТНЫХ СОРУЖЕНИЯХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Степан Эпоян, Ирина Штонда¹, Юрий Штонда²,
Сергей Шаляпин, Татьяна Шаляпина³, Алексей Зубко⁴.

¹Харьковский национальный университет строительства и архитектуры
Украина, 61002, г. Харьков, ул. Сумская, 40
karagiaur@ramler.ru, shtonda@i.ua

²ООО «Водный проект КРЫМ»
Украина 95004, АР Крым, г. Симферополь, ул. К. Маркса, 40
shtonda-yurij@yandex.ru

³ООО «Харьковская электротехническая компания»,
Украина, 61072, г. Харьков, пр. Ленина, 60
vodogray@helco.com.ua

⁴ООО «НПФ ЭКВИК»
Украина, 98500, АР Крым, г. Алушга, ул. В. Хромых, 29, оф. 5
zubko@ekvik.com

Аннотация. Приведены данные по эффективному обеззараживанию сточных вод на локальных канализационных очистных сооружениях в АР Крым при использовании ультрафиолетового излучения.

Ключевые слова: локальные канализационные очистные сооружения, сточная вода, обеззараживание, хлорирование, озонирование, ультрафиолетовое излучение.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время неэффективное обеззараживанию сточных вод на канализационных очистных сооружениях оказывает активное влияние на качество жизни населения, и это особенно заметно с ухудшением экологической обстановки в . Основным источником водоснабжения в Украине являются большие и малые реки. Более 70% населения Украины получает питьевую воду с поверхностных источников. В свою очередь, эти же реки являются общим коллектором для сброса и отвода сточных вод, от качества очистки и обеззараживания которых зависит качество воды, которую мы используем каждый день.

Согласно европейским стандартам сточные воды делятся на пять классов опасности. К первому и наименее опасному типу относятся сточные воды, в которых отсутствуют вредные для здоровья токсичные вещества, придающие воде неприятные привкусы и запахи. Ко второму типу относятся сточные воды, имеющие неприятные привкусы, запах и окраску. К третьему – те, что содержат довольно небольшое количество вредных веществ. К четвертому типу относятся сточные воды, содержащие ядовитые, канцерогенные или радиоактивные вещества. И, наконец, к пятому и особо опасному типу относятся сточные воды, содержащие большое количество возбудителей инфекционных заболеваний.

Микробиологическое качество сточных вод регламентируется следующими показателями [8]:

- вода не должна содержать возбудителей инфекционных заболеваний;
- коли-индекс сточных вод не должен превышать 1000 КУО/дм³;
- содержание колифагов не должен превышать 1000 БУО/дм³;
- вода не должна содержать жизнеспособных яиц гельминтов, онкосферы тениид и жизнеспособных цист патогенных кишечных простейших.

Практически все сточные воды содержат возбудителей таких опасных заболеваний как холера, дизентерия, тиф, сальмонеллез, вирусный гепатит, полиомиелит, энтеровирусные и аденовирусные инфекции, лямблиоз, лептоспироз, бруцеллез, туберкулез, гельминтозы и другие. По данным Всемирной организации здравоохранения, более 65% населения земного шара имели инфекционные заболевания, обусловленные загрязнением водоемов, в том числе и сточными водами.

Учитывая большую эпидемиологическую опасность, очистные сооружения, на которых происходит очистка сточных вод, в обязательном порядке должны иметь специальное оборудование для обеззараживания очищенной сточной воды.

Обеззараживание сточных вод стоит менее остро в городах и поселках где имеются канализационные очистные сооружения. Но в селах, дачных кооперативах и пансионатах, лишенных возможности подключения к централизованной канализационной сети, где установлены и эксплуатируются локальные канализационные

очистные сооружения (септики, и т.п.), эта проблема стоит на первом месте [12].

На сегодняшний день в практике очистки сточных вод применяются три основных метода обеззараживания: хлорирование, озонирование и обеззараживание с помощью ультрафиолетового (УФ) излучения. Методы хлорирования и озонирования относятся к химическим методам обеззараживания. Принцип их действия основан на окислении оболочек клеток микроорганизмов, что приводит к их разрушению, и как следствие, к гибели самих микроорганизмов. Процесс обеззараживания длится не менее 30 минут, что требует наличия соответствующих реакционных камер, или достаточной длины коллектора, в котором будет проходить процесс обеззараживания. Метод УФ обеззараживания относится к физическим методам. Обеззараживание очищенной сточной воды происходит в результате мгновенного повреждения клеток микроорганизмов коротковолновым ультрафиолетовым излучением. Длительность обеззараживания составляет несколько секунд, что позволяет использовать этот метод без применения реакционных камер или контактных резервуаров и коллекторов. Кроме того, при ультрафиолетовом облучении сточных вод (в отличие от химических методов обеззараживания) происходит эффективное уничтожение таких опасных вирусов как гепатит, полиомиелит, а также энтеровирусов, аденовирусов и др. [10].

На эффективность обеззараживания сточных вод влияют следующие показатели:

- общее содержание в воде органических веществ;
- концентрация взвешенных веществ,
- начальная концентрация бактерий и вирусов;
- температура и водородный (для химических методов обеззараживания) показатель воды;
- количество реагентов, попадающих в воду, или количество энергии УФ излучения, которая поглощена микроорганизмами (величина дозы УФ излучения) и т.д.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Среди химических методов обеззараживания сточных вод наиболее распространённой в настоящее время является технология хлорирования. Широкое внедрение этой технологии обусловлено, прежде всего, её относительной простотой и небольшими эксплуатационными расходами. Для обеззараживания сточных вод используются как газообразный хлор Cl_2 , так и гипохлорит натрия $NaClO$ или диоксид хлора ClO_2 . Широкое использование газообразного хлора и гипохлорита натрия обусловлено их доступностью и небольшой ценой. Обеззараживание сточных вод с помощью хлора или гипохлорита натрия обеспечивает достаточно высокую бактерицидную эффективность и низкие эксплуатационные

расходы. Однако их использование имеет недостаточно высокую эффективность в отношении вирусов, присутствующих в сточных водах. Более высокую эффективность в отношении вирусов имеет диоксид хлора ClO_2 . При обработке воды диоксидом хлора процент выживших клеток, бактерий и вирусов гораздо меньше, чем при применении хлора в той же концентрации и при таком же времени контакта. Однако увеличение загрязнённости воды органическими соединениями и взвешенными веществами существенно уменьшает обеззараживающее действие хлора и его производных, что приводит к необходимости значительного (в несколько раз) повышения доз реагента. Кроме того, применение технологии обеззараживания сточных вод с помощью хлора и хлорсодержащих реагентов требует внедрения достаточно эффективных мер безопасности, что приводит к росту себестоимости обеззараживания. Кроме того, диоксид хлора имеет повышенную взрывоопасность и является достаточно дорогим реагентом.

Несмотря на высокую эффективность обеззараживания, хлорирование (при дозе остаточного хлора $1,5 \text{ мг/дм}^3$) не обеспечивает необходимой санитарно-эпидемиологической безопасности относительно присутствующих в сточных водах вирусов, цист простейших, лямблий и устойчивых к действию хлора форм микроорганизмов, что приводит к микробиологическому загрязнению городских систем водоотведения. Отрицательным свойством хлорирования также является образование таких опасных хлорорганических соединений как тригалогенметаны, хлорфенолы, хлорамины, а также различные диоксиды, образующиеся при взаимодействии хлорированной воды с фенольными соединениями, находящимися в сточных водах. Эти хлорорганические соединения обладают высокой токсичностью, мутагенностью и канцерогенностью. Они обладают повышенной устойчивостью к биологическому окислению и не поддаются удалению при биологической очистке на очистных сооружениях.

В последние годы поднимается вопрос о необходимости полного отказа от хлорирования сточных вод при их очистке. Так, согласно действующим в Российской Федерации нормативным документам [4] по организации государственного санитарно - эпидемиологического надзора за обеззараживанием сточных вод, количество остаточного хлора в сточных водах, сбрасываемых в водоёмы, не должно превышать $1,5 \text{ мг/дм}^3$. Но даже такое небольшое количество остаточного хлора оказывается очень токсичным для флоры и фауны водоёмов и приводит к практически полному прекращению процессов самоочищения этих водоёмов. Беспокойство, вызванное повышенной токсичностью следов остаточного хлора и хлораминов, диктует

необходимость снижения остаточной концентрации хлора до $0,1 \text{ мг/дм}^3$.

Наряду с хлорированием для обеззараживания сточных вод также используется метод озонирования. При сравнении с методом обеззараживания сточных вод с помощью хлора озон имеет более сильное бактерицидное, вирулицидное и спороцидное действие. Он эффективно разрушает оболочки клеток бактерий, вирусов, спор, плесени, что приводит к их гибели. Благодаря высокому окислительному потенциалу озон вступает во взаимодействие со многими органическими веществами и обеспечивает их трансформацию в минеральные соединения. Однако применение озона для обеззараживания сточных вод имеет свои особенности. Так, при наличии в сточной воде достаточно высоких концентраций органических соединений в обработанной озоном воде могут образовываться токсичные вещества. Поэтому, обеззараживание сточных вод озоном целесообразно применять после ее предварительной очистки, обеспечивающей снижение содержания взвешенных веществ до $3-5 \text{ мг/дм}^3$ и БПК_{полн} до 10 мг/дм^3 .

Принципиальные трудности при обеззараживании сточных вод озоном связаны с достаточно большими затратами электроэнергии, которая необходима для получения озона, сложностью электроразрядных озонаторов, низкой растворимостью озона в теплой воде, высокой токсичностью самого озона и возможностью образования токсичных побочных продуктов. Вследствие образования в воде органических соединений, которые являются питательной субстанцией для бактерий, озонирование сточных вод может способствовать вторичному росту микроорганизмов, что значительно снижает эффективность процесса обеззараживания. Как уже отмечалось, обеззараживание сточных вод озоном требует достаточно больших затрат электроэнергии, удельные расходы которой составляют от $27-35 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ на 1 кг озона (полученного из осушенного воздуха) до $43-57 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ на 1 кг озона (который получен из неосушенного воздуха) [5]. Что приводит к достаточно высоким эксплуатационным расходам. Это резко ограничивает область применения озоновых технологий для обеззараживания сточных вод.

Применение озона для обеззараживания сточных вод становится целесообразным на заключительном этапе очистки сточных вод, когда для достижения обеззараживающего эффекта требуется значительно меньший расход озона или требуется получить более высокую степень очистки сточных вод и обеспечить обезвреживание присутствующих в воде токсичных соединений.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Практически все локальные канализационные очистные сооружения для очистки бытовых сточных вод в Украине, а также в странах СНГ, являются системами с биологической очисткой. Биологическая очистка сточных вод осуществляется при помощи микроорганизмов, которые окисляют органические загрязнения, присутствующие в сточных водах, при этом выделяя энергию. Наличие в бытовых сточных водах большого количества соединений азота и фосфора, при попадании их в поверхностные и подземные водные объекты, приводит к ухудшению качества воды и почв, и как следствие наличие нитратов в плодах растений произрастающих на этих почвах, а также развитию токсичных микроорганизмов в водоемах [2,3,7,9,13,20]. Для удаления с бытовых сточных вод соединений азота и фосфора применяются процессы нитрификации, денитрификации и биологического удаления азота.

Нитрификация – это микробиологический процесс, в ходе которого аммоний превращается в нитрит, а нитрит в конечном итоге – в нитрат. Нитрификацию осуществляет очень ограниченная группа автотрофных микроорганизмов. Процесс проходит в два этапа. На первом этапе аммоний окисляется до нитрита под действием бактерий, называемых *Nitrosomonas*. Затем нитрит окисляется до нитрата под действием другой группы бактерий – *Nitrobacter*.

Денитрификация – это процесс превращения нитрата в атмосферный азот под действием бактерий. При этом для окисления органических веществ используется не кислород, а нитрат. Денитрификация происходит там, где имеется нитрат и отсутствует (или почти отсутствует) кислород. Большинство денитрифицирующих бактерий – факультативные аэробы, т.е. при наличии кислорода они предпочитают его в качестве окислителя.

В процессе биологического удаления фосфора бактерии потребляют большие количества фосфата, который используется ими в качестве энергетического запаса, позволяющего разлагать субстрат в анаэробных условиях. Восполнение израсходованного фосфата происходит в аэробных и аноксидных условиях. В аэробных условиях количество потребленных из воды фосфатов больше, чем количество фосфатов, выделенное на предыдущем анаэробном этапе. Таким образом, разница между этими двумя величинами обуславливает эффективность удаления фосфора из сточных вод.

Для эффективной биологической очистки сточных вод в локальных канализационных очистных сооружениях [6,18,19] используются анаэробные, аэробные и аноксидные процессы. По способу применения этих процессов локальные канализационные очистные сооружения возможно разделить на две группы.

Первая группа – это локальные канализационные очистные сооружения в которых биологическая очистка бытовых сточных вод осуществляется в результате использования аэробных и анаэробных процессов в аэротенках при наличии достаточного количества растворенного кислорода. Данная группа локальных канализационных очистных сооружений эффективно удаляет с бытовых сточных вод соединения азота и органические загрязнения.

Вторая группа – это локальные канализационные очистные сооружения, в которых биологическая очистка бытовых сточных вод осуществляется в результате использования анаэробных процессов в септической зоне и аэробных процессов в аэротенках при наличии достаточного количества растворенного кислорода. Данная группа локальных канализационных очистных сооружений эффективно удаляет с бытовых сточных вод органические загрязнения, соединения азота и фосфора [11,14-17].

Учитывая общегосударственную направленность на внедрение эффективных технологий, для устойчивого обеспечения обеззараживания на локальных канализационных очистных сооружениях разработана система обеззараживания с помощью ультрафиолетового облучения, которая приводит к дезинфекции сточных вод и не способствует образованию в обеззараженной сточной воде опасных токсичных соединений.

УФ излучение является губительным для большинства присутствующих в воде

микроорганизмов. Особенно опасно УФ излучение действует на бактерии и вирусы, которые возбуждают такие опасные заболевания, как дизентерия, холера, тиф, туберкулез, вирусный гепатит, полиомиелит и другие. УФ обеззараживание сточной воды осуществляется за счёт прямого действия ультрафиолетовых лучей на клеточную и молекулярную структуру микроорганизмов, что вызывает разрушение молекул ДНК и повреждение оболочек клеток микроорганизмов, что приводит к их мгновенной гибели. Обеззараживание воды с помощью УФ излучения осуществляется без внесения в воду вредных химических соединений. Единственным условием применения метода УФ обеззараживания является правильно выбранная доза УФ облучения, т.е. количество ультрафиолетовой энергии, которая необходима для уничтожения находящихся в воде микроорганизмов.

Благодаря высокой эффективности обеззараживания и своей простоте технология УФ обеззараживания воды получает все большую популярность. Так, только в Северной Америке более 1500 муниципалитетов используют ультрафиолетовое облучение для обеззараживания сточных вод. Крупнейшая в мире станция УФ обеззараживания сточных вод, производительностью более 1 млн. м³/сут, расположена в г. Калгари (Канада). Технология УФ обеззараживания сточных вод начала активно применяться в России и Украине. Сравнительные дозы обеззараживания приведены на рис. 1 [1].

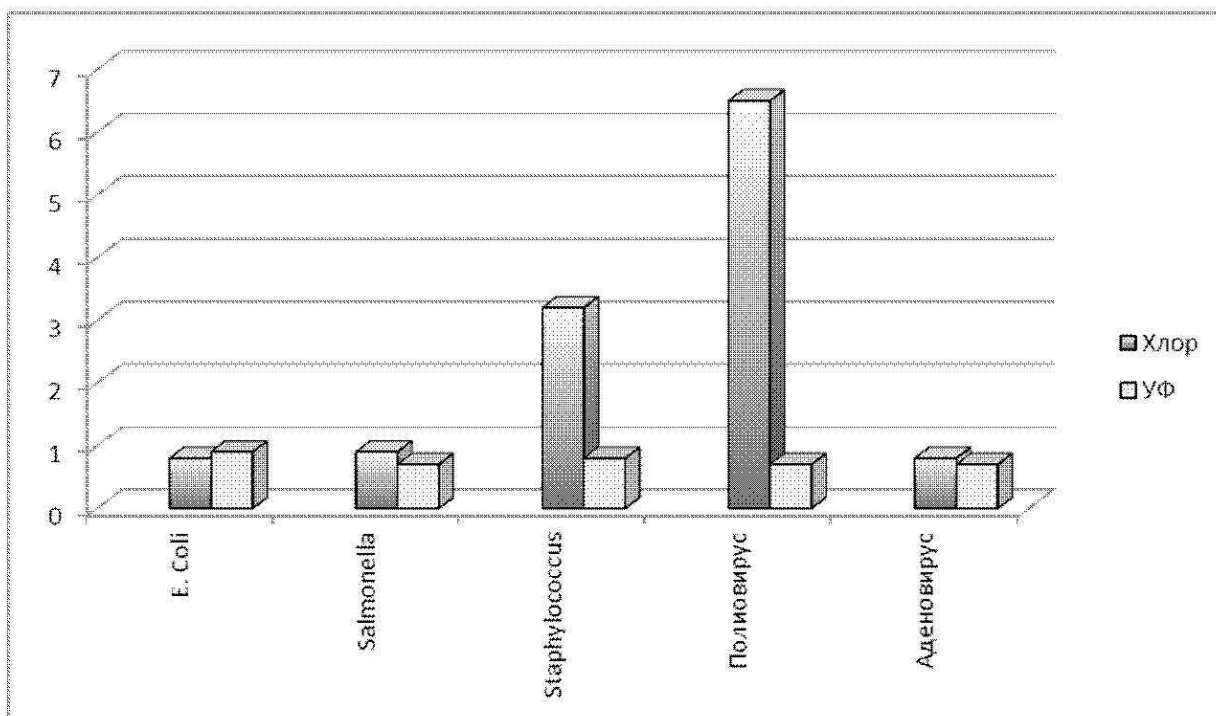


Рис. 1. Относительные дозы хлора и УФ облучения, которые необходимы для обеззараживания сточных вод [1]

Fig. 1. The relative doses of chlorine, and UV radiation required to disinfect waste water

Появление мощных и энергосберегающих источников УФ – излучения с достаточно большим ресурсом (более 16000 часов) и новые конструктивные решения УФ установок сделали этот метод конкурентоспособным, по сравнению с химическими методами обеззараживания, особенно при учете повышения устойчивости микрофлоры к воздействию на неё хлора, озона и ультрафиолета. За последние 15-20 лет устойчивость патогенной микрофлоры к влиянию на неё хлора повысилась в 5-6 раз, что с учётом дальнейшего повышения устойчивости микроорганизмов к обеззараживающим факторам, при проектировании очистных сооружений, необходимо закладывать повышенные дозы хлора или озона, что, безусловно, приведёт к дальнейшему загрязнению водоемов токсичными продуктами хлорирования и озонирования. Повышение дозы ультрафиолетового облучения с 20-30 мДж/см² до 40-100 мДж/см² в силу своей природы не окажет отрицательного воздействия на окружающую среду.

Опыт применения технологии УФ для обеззараживания сточных вод на локальных канализационных очистных сооружениях Южного берега Крыма показывает, что при использовании УФ излучения на лотковых установках В-1КС – В-4КС необходимо учитывать все факторы, влияющие на процесс дезинфекции. Установлено, что УФ излучение действует на вирусы намного эффективнее, чем хлор, и не приводит (в отличие от хлорирования или озонирования) к образованиям в сточных водах токсичных веществ, что в свою очередь делает целесообразным широкое внедрение

УФ технологий обеззараживания сточных вод на малых, средних и крупных очистных сооружениях.

Дальнейшее развитие технологий обеззараживания сточных вод способствовало появлению еще одного метода обеззараживания – так называемого комбинированного метода или технологии активного окисления (Advanced Oxidation Process). Суть этого метода заключается в совместной обработке воды ультрафиолетовым излучением и окислителем, таким как озон, пероксид водорода или гипохлорит натрия. Применение такой обработки воды позволяет не только обеспечить высокую эффективность уничтожения бактерий и вирусов, находящихся в воде, но и исключить загрязнение воды токсичными хлороорганическими соединениями. Кроме того, применение комбинации ультрафиолетового излучения с озоном, пероксидом водорода или гипохлоритом натрия обеспечивает снижение цветности воды, а также обеспечивает эффективное уничтожение грибов, плесени и размножающихся в воде водорослей (табл. 1).

При выборе метода комбинированной обработки воды особое внимание следует обращать на экономическую целесообразность и технологическую возможность его применения. Так, при применении для обработки воды УФ излучения и озона (УФ + О₃) необходимо учитывать, что озон является токсичным и очень неустойчивым газом. В связи с чем, его необходимо получать непосредственно на месте эксплуатации обеззараживающего оборудования.

Таблица 1. Сравнительная таблица различных методов обеззараживания сточных вод
Table 1. Comparative table of different methods of disinfection of wastewater

Показатели	Качественные показатели эффективности применения различных методов обеззараживания сточных вод						
	Cl ₂ (NaOCl)	Озон (O ₃)	УФ	УФ + NaOCl	УФ + H ₂ O ₂	УФ + Озон	Озон + УФ + H ₂ O ₂
Уничтожение бактерий	+	+	+	+	+	+	+
Уничтожение вирусов	-	+	+	+	+	+	+
Уничтожение простейших микроорганизмов	±	++	+	++	++	++	++
Образование токсинов	+	+	-	-	-	-	-
Окислительная способность	+	++	+	+	++	++	+++
Деструкция органических веществ, сине-зелёных водорослей, плесени и др.	+	++	++	++	++	++	+++
Снижение цветности воды и интенсивности её запахов	+	++	++	++	++	++	+++
Снижение ХПК и БПК	+	+	+	+	+	+	+
Увеличение прозрачности воды	±	++	+	++	++	++	+++
Наличие в воде остатков	++	-	-	±	-	-	-

хлорорганических веществ							
--------------------------	--	--	--	--	--	--	--

При этом необходимо соблюдать строгие меры безопасности, так как концентрация озона в зоне нахождения обслуживающего персонала не должна превышать предельно-допустимой концентрации (ПДК $< 0,1 \text{ мг/м}^3$). Кроме того, получение озона связано со значительными энергозатратами ($27\text{-}57 \text{ кВт}\cdot\text{год/кг}\text{O}_3$). Поэтому на средних и особенно крупных очистных сооружениях становится целесообразным применение вместо озона других окислителей, например, пероксида водорода или гипохлорита натрия, т.е. становится целесообразным применение метода обеззараживания воды, основанного на совместном действии ультрафиолетового облучения и пероксида водорода ($\text{УФ} + \text{H}_2\text{O}_2$) или гипохлорита натрия ($\text{УФ} + \text{NaOCl}$).

Пероксид водорода представляет собой бесцветную жидкость. Ввод в обеззараживаемую воду пероксида водорода производится с помощью широко распространенных дозирующих насосов, применяемых для введения в воду гипохлорита натрия. Принцип обеззараживания сточных вод методом комбинированной обработки ультрафиолетовым излучением и пероксидом водорода основан на явлении фотолиза пероксида водорода под действием УФ излучения. При ультрафиолетовом облучении пероксида водорода происходит его разложение и образование свободных радикалов $\text{OH}\cdot$, H_2O_2 и $2\text{OH}\cdot$, которые являются одними из самых сильных и экологически безопасных окислителей. Они способны разрушать достаточно стойкие органические соединения и микроорганизмы, в том числе такие, как цисты лямблий, споры грибов, плесень, водоросли и органические соединения, которые размножаются в воде и придают ей зеленоватый цвет и неприятный болотистый запах.

Образующиеся в результате фотолиза свободные радикалы не являются устойчивыми веществами, они быстро разлагаются на воду и кислород. Продолжительность рекомбинации свободных радикалов, которые образуются в воде в результате фотолиза пероксида водорода, не превышает несколько десятков минут. В результате чего концентрация остаточного пероксида водорода не превышает предельно допустимых значений: $0,1$ и $0,01 \text{ мг/дм}^3$ в водоёмах культурно-бытового и рыбохозяйственного назначения соответственно. Следует заметить, что при применении комбинированного метода обеззараживания (Advanced Oxidation Process), расход озона или пероксида водорода, или гипохлорита натрия значительно меньше, чем при их раздельном использовании. Это положительно сказывается на себестоимости обеззараживания сточных вод.

Эффективность действия того или иного метода обеззараживания зависит от многих факторов, в том числе от начальной концентрации

взвешенных веществ, исходного количества бактерий, вирусов и простейших микроорганизмов, находящихся в воде, а также от других её показателей. На качество обеззараживания сточной воды влияет количество обеззараживающих реагентов, которые добавляются в воду, или величина дозы ультрафиолетового облучения. Все эти факторы влияют на экономические показатели процесса обеззараживания.

Для оценки себестоимости процесса обеззараживания сточных вод необходимо оценить удельные затраты, которые необходимо понести для осуществления обеззараживания 1 м^3 сточных вод. Эти расходы состоят из стоимости хлора или гипохлорита натрия, стоимости их транспортировки к очистным сооружениям и эксплуатационных расходов (которые в свою очередь состоят из расходов на заработную плату обслуживающего персонала), расходов, связанных с обеспечением мер безопасной эксплуатации хлораторного или озонаторного оборудования и др.

Согласно действующим нормам расход хлора для обеззараживания 1 дм^3 сточных вод составляет от 5 до 10 мг активного хлора. То есть, удельный расход активного хлора для обеззараживания 1 м^3 сточных вод составляет от 5 до 10 г/м^3 . Учитывая, что цена 1 тонны хлора составляет 6500 грн., а гипохлорита натрия 3300 грн./т (при массовом содержании активного хлора $11\text{-}13\%$), стоимость хлора, который необходимо затратить для обеззараживания 1 м^3 сточных вод составит $0,032\text{-}0,065$ грн./ м^3 . Количество гипохлорита натрия, который необходимо использовать для обеззараживания 1 м^3 сточных вод (при среднем массовом содержании активного хлора 12%), будет в $8,3$ раза больше, чем хлора. То есть, для обеззараживания 1 м^3 сточных вод с помощью гипохлорита натрия необходимо потратить $41,5\text{-}83$ грамм этого реагента. При этом удельная стоимость гипохлорита натрия, который необходимо использовать для обеззараживания 1 м^3 сточных вод составит $0,137\text{-}0,274$ грн./ м^3 .

Аналогично можно оценить себестоимость обеззараживания сточных вод озоном. Учитывая, что расход озона для обеззараживания сточных вод составляет от 6 до $10 \text{ мг}\text{O}_3/\text{дм}^3$, и то, что для получения 1 кг озона необходимо потратить от 27 до $57 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ электроэнергии, можно оценить себестоимость процесса обеззараживания сточных вод озоном. Удельные затраты электроэнергии для осуществления процесса обеззараживания сточных вод составляют $0,16\text{-}0,57 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^3$ сточных вод. При стоимости электроэнергии, равной $1,2$ грн./ $\text{кВт}\cdot\text{ч}$, стоимость электроэнергии, которая необходима для обеззараживания 1 м^3 сточных вод, составит $0,194\text{-}0,648$ грн./ м^3 . Оценивая затраты, связанные с эксплуатацией озонаторов в $10\text{-}15\%$ затраченной электроэнергии, можно приблизительно оценить

себестоимость обеззараживания сточных вод озоном. Эта себестоимость составит 0,213-0,745 грн./м³.

При обеззараживании сточных вод ультрафиолетовым облучением основными факторами, которые влияют на себестоимость процесса обеззараживания, являются удельные расходы электроэнергии, ресурс УФ ламп, их стоимость и расходы, связанные с непосредственной эксплуатацией УФ оборудования. Учитывая, что удельные затраты электроэнергии для обеззараживания 1 м³ предварительно очищенных сточных вод составляют от 20 до 30 Вт/м³, стоимость затраченной на обеззараживание 1 м³ сточных вод электроэнергии составит 0,024-0,036 грн./м³. Учитывая цены на УФ лампы, их ресурс (9000-16000 часов), а также среднюю удельную производительность УФ ламп, которая при обеззараживании очищенных сточных вод составляет 0,04-0,05 м³/(Вт·ч), становится возможным оценить удельную стоимость УФ ламп, которая составляет 0,017-0,024 грн./м³. Также учитывая, что современные УФ установки практически не требуют обслуживания, эксплуатационными затратами которые связаны с их техническим обслуживанием можно пренебречь. Подсчитывая удельные расходы, связанные с затратами на используемую электроэнергию и закупку УФ ламп, можно сделать вывод, что удельные затраты на УФ обеззараживания предварительно очищенных сточных вод составляют 0,041-0,06 грн./м³. Что практически совпадает с удельными затратами обеззараживания очищенных сточных вод хлором и значительно ниже, чем при обеззараживании стоков гипохлоритом натрия или озоном.

Учитывая экологические, эксплуатационные и экономические аспекты обеззараживания сточных вод различными методами можно сделать вывод о перспективности применении метода обеззараживания сточных вод ультрафиолетовым облучением.

ВЫВОДЫ

1. Для обеспечения экологической безопасности прибрежной зоны Черного и Азовского морей, предлагается для устойчивого и бесперебойного обеззараживания очищенной сточной воды, на примере локальных канализационных очистных сооружений Южного берега Крыма, использовать разработанные технические решения для обеззараживания очищенной сточной воды с помощью ультрафиолетового облучения.

2. Технология обеззараживания сточной воды УФ излучением является наиболее простой как в реализации, так и при обслуживании УФ оборудования. Применение метода УФ обеззараживания сточных вод полностью исключает

загрязнение окружающей среды, поверхностных и подземных вод хлором и хлорорганическими соединениями.

3. УФ облучения, в отличие от химических методов обеззараживания (хлорирования и озонирования) не изменяет химический состав воды и не оказывает вредного воздействия на окружающую среду, что в полной мере обеспечивает сохранность флоры и фауны водоёмов, в которые сбрасываются очищенные и обезвреженные сточные воды. Многочисленные исследования показали отсутствие вредного воздействия УФ излучения на воду при дозах облучения, которые намного превышают практически необходимые для её обеззараживания.

4. Применение комбинированных методов обеззараживания позволяет не только обеспечить высокую эффективность уничтожения находящихся в сточной воде бактерий и вирусов, но и исключить её загрязнение токсичными соединениями. При этом обеспечивается деструкция органических загрязнителей, а также эффективное уничтожение грибов, плесени и водорослей, которые размножаются в воде.

5. Эксплуатация обеззараживающих УФ установок значительно проще, чем станций, предназначенных для обеззараживания сточных вод хлорированием или озонированием, и не связана с применением высокотоксичных ядовитых веществ, которые негативно влияют на здоровье обслуживающего персонала. При этом полностью исключается возможность возникновения аварийных ситуаций, связанных с утечкой хлора. Это позволяет размещать станции УФ обеззараживания рядом с жилым сектором или зонами отдыха.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бутин В.М., Волков С. В., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Якименко А.В. Обеззараживание питьевой воды УФ – излучением. Водоснабжение, №12 – 96. – <http://www.waterland.ru>.
2. Василенко О.А., Грабовський П.О., Ларкіна Г.М., Поліщук О.В., Прогульний В.Й. 2010 Реконструкція і інтенсифікація споруд водопостачання та водовідведення. – К.: ІВНВКП «Укреліотех». –212-219.
3. Гончарук Е.И., Давиденко А.И., Каминский Я.М., Кигель М.Е., Полищук Ю.С. 1974 Малогабаритные очистные сооружения канализации. – К.: – Будівельник. – 144-154.
4. Методические указания МУ 2.1.5.800 – 99: Организация госсанэпиднадзора за обеззараживанием сточных вод. – Минздрав России, Москва 2000.
5. Очистка сточных вод озонированием. – <http://stroy-spravka.ru/ochistka-stochnykh-vod-ozonirovaniem>.

6. Пацай Ю.И., Штонда Ю.И., Штонда И.Ю. 2011 Локальные канализационные очистные сооружения для коттеджей и частных домов. // Научно-практический журнал «Вода і водоочисні технології». – Київ – №1. – 56 – 59.
7. Разумовский Э.С., Медриш Г.Л., Казарян В.А. 1986 Очистка и обеззараживание сточных вод малых населенных пунктов. – М. : – Стройиздат. – 36-38, 60-73.
8. Санитарные правила и нормы охраны поверхностных вод от загрязнения: СанПиН 4630 – 88.- М., 1998.
9. Санитарные правила и нормы охраны прибрежных вод морей от загрязнения в местах водопользования населения: СанПиН 4631 – 88. – М., 1988.
10. Шаляпин С.М., Штонда Ю.И., Шаляпина Т. С. 2013 Застосування УФ опромінення для знезараження стічних вод на малих очисних спорудах. // Виробничо-практичний журнал «Водопостачання та водовідведення». – Київ – №2/13. – 14-19.
11. Штонда Ю.И., Зубко А.Л. 2010 Интенсификация очистки сточных вод на малогабаритных очистных сооружениях Крыма. // ВСТ. Водоснабжение и Санитарная Техника – Москва – Houstechnik. – № 9.- 8 – 12.
12. Штонда Ю.И., Зубко А.Л. 2011 Решение проблемы очистки сточных вод курортных городов (На примере Украины). // Производственный и научно-популярный журнал «ЖКХ. Экономика и управление предприятием ЖКГ». – Москва. — №5.- Ч. I. – 71-73.
13. Штонда Ю.И., Коломийцев Н.И., Фирсенков Ю.А., Штонда И.Ю. 2009 Влияние активной застройки на Экологическую безопасность и экосистему прибрежной зоны Черного моря в посёлках восточного региона Большой Алушты. // Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення, V міжнародна науково-практична конференція, м. Алушта 7-11 вересня 2009 р, Збірник наукових статей. Харків: «Райдер». – Т. 1. – 105 – 109.
14. Эпоян С.М., Михал Нос, Штонда Ю. И., Пацай Ю.И., Коваль С.П. 2013 Сооружения для очистки сточных вод рекреационного комплекса "Аян-Дере". // Научный вестник строительства. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ. - Вып. 71.- 376-379.
15. Эпоян С.М., Штонда И.Ю., Штонда Ю.И., Зубко А.Л., Звягинцев Ю.М. 2010 Интенсификация работы малогабаритных канализационных очистных сооружений с использованием солнечной энергии. // Motrol. Motorization and power industry in agriculture. – Volume 12 C. – Simferopol – Lublin. – 315-321.
16. Эпоян С.М., Штонда И.Ю., Штонда Ю.И., Зубко А.Л., Намяк Д.Е. Повышение эффективности работы малых канализационных очистных сооружений. // Сборник статей Международного конгресса и технической выставки ЭТЭВК-2013. Украина, АР Крым, г. Ялта, 01 – 05 июня 2013 г. – 270-274.
17. Эпоян С.М., Штонда И.Ю., Штонда Ю.И., Зубко А.Л. Интенсификация очистки сточных вод на малых канализационных очистных сооружениях. // Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення // VII міжнародна науково-практична конференція, м. Алушта 12-16 вересня 2011 р, Збірник наукових статей. Харків: «Райдер». 2011.- Т. 1. –323 – 326.
18. Эпоян С.М., Штонда И.Ю., Штонда Ю. И., Пацай Ю.И., Коваль С. П. 2012 Локальные канализационные очистные сооружения «AS-VARIOcomp» для частных домов и малых объектов водопользования. // Научный вестник строительства. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ.- Вып.69.- 279-283.
19. Эпоян С.М., Штонда И.Ю., Штонда Ю.И. 2011 Локальные канализационные очистные сооружения для частных домов и малых объектов водопользования. // Научный вестник строительства. — Харків : ХДТУБА, ХОТВ АБУ. - Вып.65.- 335-339.
20. S. Epojjan, I. Shtonda, Y. Shtonda, A. Zubko, Y. Zvyagintsev. 2011 Solar energy usage for the improvement of the treatment efficiency and operation stability at small-scale wastewater treatment plants. // Motrol. Motorization and power industry in agriculture. – Volume 13C. – Simferopol-Lublin. – 91-96.

DISINFECTION OF WASTE WATER ON THE LOCAL SEWAGE TREATMENT FACILITIES WITH USE ULTRAVIOLET RADIATION

Summary: the data of increase of efficiency disinfection of waste water on the local sewage treatment facilities of Crimea with use ultraviolet radiation.

Key words: local sewage treatment facilities, waste water, disinfection, chlorination, ozonization, ultraviolet radiation.

СОВРЕМЕННЫЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ РЕШЕНИЯ В ОБРАБОТКЕ СТОЧНЫХ ВОД

Александр Смирнов¹, Валентина Юрченко², Михаил Есин¹, Андрей Артеменко²

¹ГК «Экополимер»,

Адрес: Россия, г. Москва, Б. Строченовский пер., 7,

E-mail: smimovav@ecopolymer.com

²Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

Адрес: Украина, г. Харьков, ул. Сумская, 40

E-mail: yurchenko.valentina@gmail.com

Аннотация. Проанализирован опыт компании «Экополимер» по внедрению энергосберегающих решений в очистке сточных вод, позволяющих снизить энергопотребление на очистных сооружениях на 65 %. Технический уровень модернизации предусматривает замену насосного и воздуходувного оборудования, установку аэраторов с высокими массообменными характеристиками, технологический - реализацию технологии нитри-денитрификации, оптимизационный - оснащение сооружений приборами контроля, учета и мониторинга процесса очистки сточных вод.

Ключевые слова: сточные воды, очистные сооружения, биологическая очистка, энергопотребление, модернизация.

ВВЕДЕНИЕ

Для соблюдения современных нормативов по содержанию остаточных загрязнений в сточных водах, сбрасываемых в природные водоемы, необходимо применять сложные и энергозатратные системы обработки, особенно на этапах биологической очистки. Практика эксплуатации сооружений биологической очистки сточных вод показывает, что себестоимость процесса очистки на 60-80 % зависит от эффективности применяемой системы аэрации, являющейся наиболее энергоемким элементом очистных сооружений. В связи с этим оптимизация процесса проектирования и эксплуатации аэрационных систем является весьма актуальной задачей.

Глобализация процессов эвтрофирования природных водоемов привела к радикальному снижению допустимого остаточного содержания биогенных элементов, в том числе азота, в очищенных сточных водах. Так, в странах Евросоюза допустимая концентрация общего азота в сточных водах - 10 мг/дм³ для объектов с условным населением свыше 100 тыс. человек и 15 мг/дм³ - для объектов с меньшим населением. Такой уровень требований обусловил активное внедрение методов глубокого удаления соединений азота, что существенно повысило энергозатраты на очистных сооружениях канализации. Известны различные методы удаления соединений азота из сточных вод, но наиболее перспективны, экономичны и эффективны биологические - нитрификация-денитрификация. Основным преимуществом технологии нитрификации-денитрификации является возможность ее реализации в традиционных сооружениях биологической очистки без дополнительных капитальных затрат.

Большой объем энергетических затрат на очистных сооружениях канализации связан также с недостаточной эффективностью и высоким потреблением электроэнергии установленного оборудования.

Современные нормы потребления электроэнергии, предъявляемые к отечественным сооружениями очистки сточных вод, требуют комплексного переоснащения технического оборудования, пересмотра существующих технологий эксплуатации, а также внедрение современных систем контроля и управления.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДОВ

Анализ литературных данных и опыта эксплуатации очистных сооружений позволяет определить основные категории энергозатрат и эффективность мероприятий по сокращению потребления электроэнергии [Energy efficiency in municipal wastewater treatment plants. Technology assessment. Lawrence J. Pakenas, P.E., 2012; Energy reference guide. Lawrence J. Pakenas, P.E., 2012; Валкина Е., Вернези С., Николенко И., Богущий П., 2010]. Распределение потребления электроэнергии в процессе очистки сточных вод представлено на рис. 1.

Как видно из рис. 1, основным потребителем электроэнергии на очистных сооружениях является аэрация (воздуходувные агрегаты) и насосное оборудование.

Сточные воды аэрируются посредством продувки их воздухом или кислородом в очистных сооружениях, а в некоторых случаях и перед выпуском в водоем. Воздух поступает в жидкость в виде пузырьков, которые всплывают и при движении через слой воды насыщают водную среду кислородом. Чем меньше размер пузырьков, тем большее количество кислорода переходит в жидкость из воздуха и, следовательно, тем ниже затраты энергии на работу аэрационного оборудования. Однако получение мелких пузырьков требует больше затрат энергии на диспергирование воздуха. Эффективность работы аэраторов характеризуется коэффициентом использования воздуха и эффективностью

аэрации. Эффективность аэрации – это расход электроэнергии, кВт·ч, на растворение 1 кг O_2 .

Для снижения энергозатрат и обеспечения современных норм потребления электроэнергии важнейшим резервом является повышение энергоэффективности работы оборудования и оптимизация энергетической схемы работы очистных сооружений [Energy reference guide. Lawrence J. Pakenas, P.E., 2012].

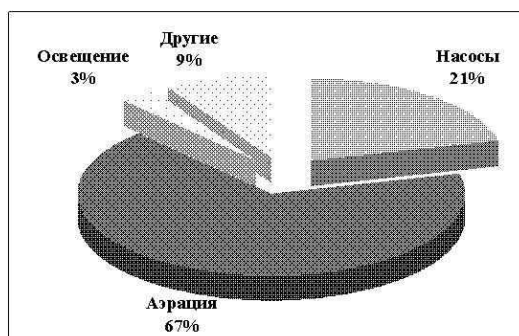


Рис. 1. Распределение потребления электроэнергии на очистных сооружениях канализации

Fig. 1. Distribution of a current consumption on waste water constructions of the sewerage

Необходимость глубокой очистки сточных вод от соединений азота обусловлена все возрастающей эвтрофикацией природных вод, что чрезвычайно осложняет водоподготовку для питьевого и промышленного водоснабжения (а в отдельных случаях полностью исключает возможность использования эвтрофированного водоема для такого водопользования), создает экологические проблемы для прилегающих регионов и проблемы для рыбного хозяйства. При общепринятых в Украине технологиях биологической очистки городских сточных вод в аэротенках удаляется основная масса органических загрязняющих веществ, но не обеспечивается глубокое удаление соединений азота. Эффективность удаления соединений этого элемента невысока, что не обеспечивает достижения требуемых нормативов на сбросе. При традиционной схеме биологической очистки аэротенк-отстойник достичь установленных нормативов на сбросе возможно только по аммонийному азоту, т.е. при организации процесса нитрификации. Но основным условием для проведения эффективной нитрификации является мелкопузырчатая система аэрации, подача необходимого количества воздуха, обеспечивающего высокую концентрацию растворенного кислорода, а также достаточное время аэрации (обычно более 6 часов), что чрезвычайно повысит расход электроэнергии.

Биологический метод глубокой очистки сточных вод от соединений азота основан на процессах нитрификации и денитрификации. Он заключается в окислении бактериями соединений азота до

нитритов и нитратов и последующего их восстановления до газообразного азота. Преимуществом двухфазных систем (отдельной для нитрификации и отдельной для денитрификации) является их высокая надежность, а недостатками – использование дополнительного источника органического субстрата, а также более высокие капитальные затраты. В практике очистки городских сточных вод более широко распространены однофазные системы [Жмур Н.С., 2003; Хенце М., Армоз П., Ля-Кур-Янсен Й., Арван Э., 2004; Nutrient Control Design Manual. State of Technology Review Report, 2009].

Несмотря на большое количество технологических схем удаления соединений азота, методы расчета таких технологий еще несовершенны и недостаточно разработаны. Реализация большинства известных технологических схем не позволяет обеспечить требуемое качество очищенных сточных вод по биогенным элементам. К настоящему времени нет общепризнанной методики определения параметров и конфигурации сооружений биологической очистки с глубоким удалением соединений азота из городских сточных вод. Также до сих пор остается нерешенной задача с критерием выбора наиболее эффективной технологической схемы для реализации на очистных сооружениях. При существовании более 10-ти различных конфигураций сооружений для глубокого удаления биогенных элементов, отсутствует механизм оценки технологической эффективности внедряемых технологических схем удаления соединений азота и фосфора. Особенно это касается сложных схем с большим количеством рециклов. Нет также надежной методики, позволяющей сделать выбор в пользу той или иной технологической схемы с учетом ряда таких параметров как качество очистки сточных вод и энергоемкость процесса.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью настоящей работы является анализ основных направлений снижения энергозатрат на различных этапах очистки городских сточных вод при обеспечении глубины удаления загрязнений (в том числе соединений азота) до нормативных требований для сброса в природный водоем.

В работе использовали данные научно-технической литературы, а также опыт компании «Экополимер» в реализации проектов строительства и реконструкции очистных сооружений канализации.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Весь комплекс мероприятий и модернизаций, направленных на снижение энергопотребления при работе очистных сооружений канализации, можно разделить на 3 основных этапа:

1. **Технический этап.** Замена насосного и воздуходувного оборудования, замена аэрационной

системы с установкой аэраторов с высокими массообменными характеристиками.

2. **Технологический этап.** Реализация технологии нитри-денитрификации в схемах биологической очистки городских сточных вод с экономным энергопотреблением и низкими капитальными затратами.

3. **Оптимизационный этап.** Оснащение очистных сооружений приборами контроля, учета и мониторинга состояния процесса очистки сточных вод, а также централизация сигналов с оборудования в диспетчерский пункт для принятия решений и выбора оптимального режима работы. На этом этапе также реализуется система управления технологическими параметрами работы сооружений и оборудования.

При реализации указанных этапов специалисты компании «Экополимер» руководствуются принципами максимальной эффективности решений.

Среди наиболее распространенных и доступных мероприятий технического этапа можно выделить замену системы аэрации. Компания «Экополимер» на протяжении более 20 лет занимается изготовлением и комплексной заменой систем аэрации. Аэрационные системы «Экополимер» успешно работают на более чем 600 муниципальных и промышленных сооружениях очистки сточных вод. На смену фильтросных плит, которые имели невысокие массообменные характеристики, пришли пневматические мелкопузырчатые аэраторы из полимеров и дисковые аэраторы с эластичной мембраной. Как показывает опыт реализации проектов, экономия электроэнергии при замене системы аэрации достигает 15 %.

Наиболее перспективными диспергирующими элементами в последнее время считаются мембранные аэраторы. Аэраторы AP-420T – это дисковые тороидальные аэраторы, выполненные из полипропилена с мембраной из специальной резины, стойкой к агрессивным средам. Крепление аэраторов выполняется на закрепленных воздуховодах.

Сравнивая эти аэраторы с другими подобными (дисковыми) аэраторами выделяются следующие преимущества [Худенко Б.М., Шпирт Е.А. 1973]:

- мелкопузырчатая аэрация и высокие массообменные характеристики;
- широкий диапазон пропускной способности аэраторов по воздуху;
- малое гидравлическое сопротивление аэраторов;
- простота конструкции, монтажа и эксплуатации;
- способность работать в непрерывном и периодическом режиме аэрации;
- надежная защита от попадания сточных вод в воздухоподводящую систему, поэтому ненужно применение водовыбросных стояков;
- некольматируемая мембрана;

- способность резиновых мембран к регенерации в ходе эксплуатации системы путем периодической продувки повышенным расходом воздуха (без опорожнения аэротенка) или промывки наружной поверхности мембран (с опорожнением аэротенка);

- высокая надежность системы и длительный срок эксплуатации за счет изготовления большинства элементов системы аэрации из полимерных материалов и нержавеющей стали, за исключением резиновых мембран;

- удачное крепление воздухопроводов с аэраторами к днищу, не ограничивающее температурные расширения конструкции – не требуется применение термокомпенсаторов.

Наличие центрального отверстия (подобных аэраторов пока нет) при определенных расходах воздуха на аэратор приводит к созданию дополнительного подсосывающего эффекта. Это сказывается на форме факела аэрации и, соответственно, на улучшении массообменных характеристик аэратора.

Насосное оборудование многих отечественных очистных сооружений канализации имеют износ около 90-95%, что негативно сказывается на энергетическом балансе сооружений и на эффективности очистки в целом. Компанией «Экополимер» выполнены проекты с заменой насосного оборудования (Нижний Новгород, Черноголовка, Городец, Новая Каховка и др.), которые позволяют экономить до 15 % потребляемой электроэнергии.

Установка новых воздуходушных агрегатов с регулируемой производительностью, которые позволяют максимально экономить электроэнергию, является наиболее дорогостоящим этапом реконструкции. Элементы технического этапа энергоэффективных решений в плане замены воздуходушного оборудования снижают потребление электроэнергии на 30 %.

На станциях аэрации и на сооружениях, где требуются большие расходы сжатого воздуха с напором свыше 10 м, применяют многоступенчатые турбовоздуходувки (до 30 м) или турбокомпрессоры (30-100 м). Турбовоздуходувки, турбокомпрессоры и нагнетатели работают по такому же принципу, что и центробежные насосы. Сжатие и нагнетание воздуха в них происходит под действием центробежной силы, которая возникает при вращении рабочего колеса. Воздух из рабочего колеса попадает в неподвижный кольцевой диффузор, который служит для превращения кинетической энергии воздуха, полученной им в рабочем колесе, в потенциальную энергию (напор).

Для этого диффузор снабжен лопатками, образующими вместе с диффузором направляющий аппарат. В конструкции воздуходувок нового поколения присутствуют регулируемые лопатки, которые и позволяют регулировать производительность воздуходувки.

Для эффективной работы воздуходушных агрегатов в аэротенке устанавливаются датчики

измерения концентрации кислорода. Перед ротором на входе воздухоудовки устанавливаются направляющие лопатки, которые по показаниям датчиков растворенного кислорода меняют свой угол поворота (соответственно, меняется количество подаваемого воздуха в диапазоне от 40 до 100%). В качестве сигнала обратной связи могут использоваться любые другие датчики: давления, расхода, станции химического анализа и т.д. Двигатель воздухоудовки работает с постоянным количеством оборотов. Вал ротора воздухоудовки через мультиплексорную передачу поддерживает постоянные обороты, фиксированные скорости вращения. КПД при этом составляет 80-87%. Поток воздуха проходит через лопатки диффузора, установленного за ротором. Автоматически регулируемый угол наклона лопаток диффузора (устанавливается сервоприводом, смонтированным на обратной стороне диффузора) обеспечивает высокую линейность поддерживаемого избыточного давления и дополнительное тонкое регулирование потока воздуха.

Технологический этап мероприятий по оптимизации энергопотребления на биологических очистных сооружениях предполагает модернизацию технологической схемы обработки стоков. Среди предлагаемых в отрасли технологических схем очистки сточных вод с глубоким удалением соединений азота внедрение схем нитри-денитрификации является наиболее доступным и широко применяемым.

Инженеры компании «Экополимер» при подборе схем нитри-денитрификации используют собственную программу «ЭкоСим», которая основана на модели работы активного ила (ASM). После публикации Международной водной ассоциацией (IWA) моделей активного ила (ASM) [Gujer W., Henze M., Mino T., Van Loosdrecht M., 1999; Henze, M., Grady, C. P. L. Jr, Gujer, W., Marais, G. v. R., Matsuo, T., 1987; Henze M., Gujer W., Mino T., Matsuo T., Wentzel M. C., Marais G. v. R., Van Loosdrecht M., 1999; Gujer, W., Henze, M., Mino, T., Van Loosdrecht M., 1999], которые включают как нитрификацию, так и денитрификацию, применение этих моделей для систем с активным илом становится все более и более популярным. На основе этих математических моделей были разработаны различные имитационные программы [Hydromantis, in: GPS-X – Technical reference, GPS-x Version 5.0, 2006; Rieger L., Koch G., Kuhni M., Gujer W., Siegrist H., 2001; BiowinTM a wastewater treatment system simulator. EnviroSim Associates LTD; WRc Group. Plan-it STOAT], которые широко используются для исследования процессов с активным илом. Большинство этих программ включают не только классические модели ASM [Henze, M., Grady, C. P. L. Jr, Gujer, W., Marais, G. v. R., Matsuo, T., 1987], но и различные собственные разработки. К ним относится и разработанная в компании Экополимер программа «ЭкоСим» [Щетинин А. И., Реготун А.

А., 2000], которая после включения моделей удаления фосфора называется «ЭкоСим 3Р».

В отличие от других моделей [Gujer W., Henze M., Mino T., Van Loosdrecht M., 1999; Henze M., Gujer W., Mino T., Matsuo T., Wentzel M. C., Marais G. v. R., Van Loosdrecht M., 1999; Rieger L., Koch G., Kuhni M., Gujer W., Siegrist H., 2001], программа «ЭкоСим 3Р» включает гидравлическую схему системы «аэротенк - вторичный отстойник». Реакторы в гидравлической модели описываются как аппараты идеального перемешивания. Количество реакторов и их объем выбираются такими же, как количество и объем участков аэротенка, имеющего самостоятельные подводы воздуха, расход которого можно регулировать. Для каждого реактора сумма входящих потоков равна сумме выходящих потоков. Скорость изменения концентраций ингредиентов в каждом из реакторов описывается дифференциальными уравнениями. Потребность в кислороде определяется для каждого аэрационного участка, что дает возможность рассчитать систему аэрации.

Компьютерная имитация процессов биологической очистки сточных вод в аэротенках является мощным современным средством, необходимым при прогнозировании проектных и эксплуатационных параметров [Щетинин А.И., Есин М.А., Реготун А.А., Малбиев Б.Ю., 2010]. На основании такой имитации в ГК «Экополимер» разработан подход к ретехнологизации сооружений биологической очистки, с учетом:

- математических моделей биохимических процессов, осуществляемых активным илом;
- существующих воздухораспределительных систем;
- выбора оптимальной схемы биологической очистки (моделирование ≥ 10 вариантов схемы);
- оптимального баланса минимальных эксплуатационных энергозатрат и приемлемого качества очистки;
- минимального количества строительных работ при реконструкции.

Важнейшим резервом экономии электроэнергии при глубокой очистке сточных вод от соединений азота является использование технологии Анаммокс, которая обеспечивает экономию 2,2 кВт·ч на каждый кг удаленного азота по сравнению с традиционной нитри-денитрификацией.

Быстроразвивающийся научно-технический прогресс привносит в современный мир новые возможности электроники. На сегодняшний день в мире большую популярность получили так называемые «умные» технологии (smart technology), под которыми понимают приборы электроники с заранее запрограммированным алгоритмом операций. В связи с этим, автоматизация очистных сооружений канализации как элемент оптимизационного этапа, приобретает четко сформированный характер.

Основа автоматизации технологических процессов – это перераспределение материальных,

энергетических и информационных потоков в соответствии с принятым критерием управления (оптимальности). Под автоматической системой управления технологическими процессами (АСУ ТП) обычно понимается комплексное решение, обеспечивающее автоматизацию основных технологических операций технологического процесса на сооружениях в целом или на каком-то отдельном его участке.

Термин «автоматизированный» в отличие от термина «автоматический» подчеркивает необходимость участия человека в отдельных операциях, как в целях сохранения контроля над процессом, так и в связи со сложностью или нецелесообразностью автоматизации отдельных операций.

АСУ ТП, как правило, имеют трехуровневую систему:

- нижний уровень — система контроля и автоматического управления технологическими подсистемами и объектами на базе микропроцессорных контроллеров, приборов КИПиА, специализированного измерительного оборудования, счетчиков;
- средний уровень образуют устройства концентрации, обработки и передачи информации от устройств нижнего уровня на верхний уровень и от верхнего уровня на нижний;
- верхний уровень — средства передачи, хранения, накопления и представления информации, а также средства локальной вычислительной сети, объединяющей рабочие станции системы.

Как правило, АСУ ТП имеет единую систему операторского управления технологическим процессом в виде одного или нескольких пультов управления, средства обработки и архивирования информации о ходе процесса, типовые элементы автоматики: датчики, устройства управления, исполнительные устройства. Для информационной связи всех подсистем используются промышленные сети.

Современный ассортимент и уровень КИПиА позволяет вывести АСУ ТП очистных сооружений на новый уровень: обустройство мониторинга и регистрации качества сточных вод, необходимое для оценки работы (расход, уровень, концентрации соединений азота и фосфора, доза и индекс ила, концентрация растворенного кислорода и органических соединений), построение автономных блоков работы (контроль уровня растворенного кислорода, динамический нитратный рецикл, автоматическая ферментация сырого осадка и т.д.), верхний уровень логического контроля и прогнозирования работы очистных сооружений канализации на основе математических моделей работы активного ила (рис. 2).

За последние 10 лет по проектам компании были выполнены работы по строительству и реконструкции более 20 объектов [Щетинин А.И., 2002; Щетинин А.И., Есин М.А., Есин А.М., 2007] с внедрением технологии удаления биогенных элементов (табл. 2).

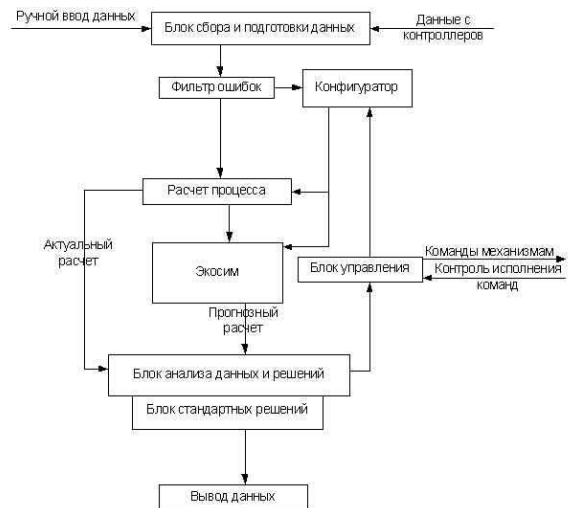


Рис. 2. Блок-схема взаимодействий верхнего уровня
Fig. 2. The block - scheme of interactions of top level

На сегодняшний день наиболее интересными проектами в плане реализации энергоэффективных решений можно отметить проект реконструкции очистных сооружений канализации г. Вологда и проект строительства очистных сооружений канализации г. Адлера.

Проект реконструкции очистных сооружений канализации г. Вологда реализуется за счет средств Европейского банка реконструкции и развития, генподрядчиком выступила компания «Экополимер» [Мешенгиссер Ю.М., Зброх С.Ю., Вавилов О.Ю., 2011]. При реализации проекта были решены следующие задачи:

- повышение эффективности работы очистных сооружений канализации и качества очистки стоков;
- использование процессов нитри-денитрификации в технологической схеме биологической очистки для снижения содержания соединения азота;
- модернизация воздухоподводящего оборудования;
- снижение (в перспективе) затрат на утилизацию обезвоженного осадка;
- повышение уровня автоматизации с одновременным сокращением времени технического обслуживания, осуществляемого эксплуатационным персоналом.

В рамках этого проекта выполнена ретехнологизация сооружений биологической очистки и модернизация воздухоподводящей станции. Для реализации технологии нитри-денитрификации существующие первичные отстойники переоборудованы под зоны перемешивания и включены в состав сооружений биологической очистки (рис. 3).

Таблица 1. Перечень очистных сооружений, на которых реализованы технологии удаления биогенных элементов или выполнены проекты реконструкции сооружений (РП)

Table 1. The list of clearing constructions on which technologies of biogenic elements removal are realized or projects of constructions reconstruction are executed

Наименование объекта	Краткая характеристика схемы	Расход, м ³ /сут	Год внедрения
ОСК г. Шостка	Ступенчатая денитрификация с пневматическим перемешиванием	30 000	2003
ОСК г. Набережные Челны	Ступенчатая денитрификация с пневматическим перемешиванием	320 000	2004
ОСК «Саратоворгсинтез»	Ступенчатая денитрификация с механическими мешалками	40 000	2004
ОСК г. Черноголовка	Собственная схема	15 000	2005
ОСК г. Щелково	А/О процесс с механическим перемешиванием и внутренней рециркуляцией	320 000	2005
ОСК ООО «Конкордия» г. Калининград	А/О процесс с механическим перемешиванием и внутренней рециркуляцией	2 000	2007
ОСК г. Нижний Новгород	Ступенчатая денитрификация с механическими мешалками (позаэтапная реконструкция)	744 200	2008 (РП), 2009
ОСК г. Городец	А/О процесс с механическим перемешиванием и внутренней рециркуляцией	10 000	2008 (РП)
ОСК г. Харьков (КБОД, КБОБ)	А ² /О процесс с механическим перемешиванием и внутренней рециркуляцией (экспериментальный блок)	50 000 50 000	2009 (РП) 2010 (РП)
БОС г. Магнитогорск (ЛБ)	А/О процесс с механическим перемешиванием и внутренней рециркуляцией	55 000	2010 (РП)
Челябинск	Ступенчатая денитрификация с механическим перемешиванием и внутренней рециркуляцией (позаэтапная реконструкция)	150 000	2010 (РП), 2011
ОСК г. Адлер	Ступенчатая денитрификация с механическим перемешиванием и внутренней рециркуляцией	100 000	2011
ОСК г. Смоленск	А ² /О процесс с механическим перемешиванием и внутренней рециркуляцией	160 000	2011 (РП)
БОС г. Новочебоксарск 3-я очередь	А ² /О процесс с механическим перемешиванием и внутренней рециркуляцией	100 000	2012
ОСК г. Вологда	А/О процесс с механическим перемешиванием и внутренней рециркуляцией	120 000	2012



Рис. 3. Анаэробный резервуар с мешалками (бывший первичный отстойник)
Fig. 3. The anaerobic tank with mixers (a former preliminary sedimentation tank)

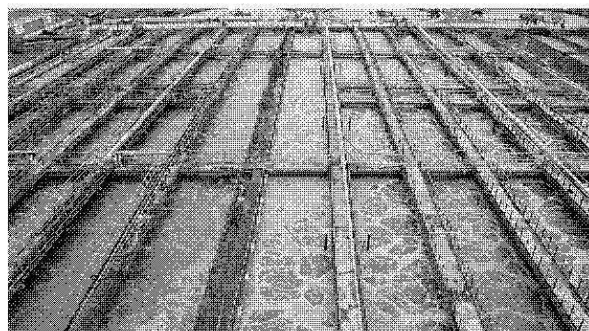


Рис. 4. Аэротенки до (слева) и после (справа) реконструкции
Fig. 4. Aerotanks: before (at the left) and after (on the right) reconstruction

Это позволило повысить надежность работы сооружений биологической очистки с обеспечением нормативного качества очистки сточных вод (рис. 4).

В воздуходувной станции установлены современные воздуходувки с диапазоном регулирования 40-100 % (рис. 5). Регулирование производительности возду-

ходувок осуществляется по сигналам датчиков концентрации растворенного кислорода, установленных в аэротенках. Также сооружения оснащены датчиками концентрации аммонийного азота, а также анализаторами концентрации нитратов, по показаниям которых осуществляется управление внутренним нитратным рециклом иловой смеси.

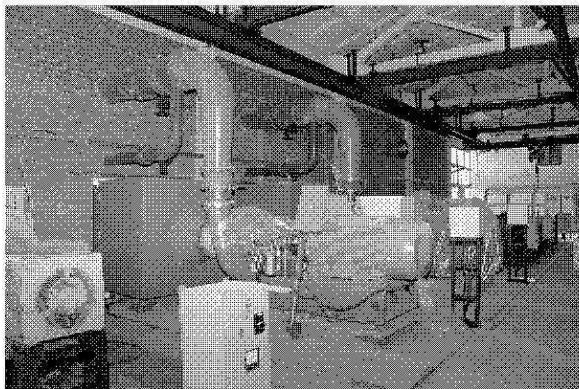


Рис. 5. Новые воздуходувные агрегаты
Fig. 5. New pressure-blowing units

Проект строительства сооружений в г. Адлере реализован в рамках программы подготовки к Зимним Олимпийским играм 2014 г. Эти сооружения построены с реализацией современных технологических решений, а также с применением современного энергоэффективного оборудования (рис. 6). Сооружения оснащены современными средствами КИПиА, средствами автоматизации и управления основными технологическими процессами. Реализованные мероприятия (высокоэффективные системы аэрации, регулируемые воздуходувки, регулируемые рециклы иловой смеси, оснащение приборами КИПиА и т.д.) позволяют осуществлять процесс очистки сточных вод с максимальной энергоэффективностью и поддержанием стабильного качества очистки сточных вод.



Рис. 6. Крытые сооружения аэротенков в г. Адлер
Fig. 6. Covered constructions of aerotanks in Adler

На примере этих сооружений показана реализация всего комплекса мероприятий, направленных на оптимизацию энергопотребления с достижением нормативного качества очищенных сточных вод.

На сегодняшний день оптимизационный этап является наиболее актуальной темой обсуждения. Оснащение сооружений приборами КИПиА, построение единой диспетчерской, а также программирование верхнего (логического) уровня является завершающим и наиболее дорогостоящим этапом реконструкции и модернизации сооружений.

В мировой практике нет аналогов полностью автоматических систем управления очистными сооружениями – системы, которая бы осуществляла управление большинством процессов на очистных сооружениях. Компания «Экополимер» совместно с мировыми лидерами производства КИПиА ведет разработки такой системы.

По мнению специалистов компании «Экополимер» внедрение перечисленных энергосберегающих решений позволяет снизить энергопотребление на очистных сооружениях канализации приблизительно на 65% (табл. 2).

Таблица 2. Эффективность предлагаемых энергосберегающих решений в очистке сточных вод на различных этапах модернизации
Table 2. Efficiency of offered energy-saving decisions in sewage treatment at various stages of modernization

Этапы модернизации	Эффективность энергосбережения, %	Мероприятия по модернизации
Технический	≥20	Замена технологического оборудования
Технологический	≥25	Специальные технологии биологической очистки
Оптимизационный	≤25	АСУ, КИПиА

ВЫВОДЫ

Опыт компании «Экополимер» доказывает, что комплексное техническое перевооружение эксплуатируемых сооружений очистки сточных вод, внедрение экономичных технологий глубокого удаления биогенных элементов и современных систем контроля и управления процессом повышает энергоэффективность сооружений минимум на 20 % на каждом этапе модернизации. Выполнение всего комплекса энергоэффективных решений позволяет снизить энергопотребление до 65 %. При этом эффективность очистки сточных вод обеспечивает достижение нормативных требований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Валкина Е., Вернези С., Николенко И., Богуцкий П., 2010. Использование методов водоочистки в новейших энергосберегающих технологиях. MOTROL. – Commission of motorization and energetic in agriculture: Polish Academy of sciences. - Lublin.- Vol.12C. – 114-120.
2. Жмур Н.С., 2003. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. – М.: АКВАРОС. – 512.
3. Мешенгиссер Ю.М., Зброх С.Ю., Вавилов О.Ю., 2011. Опыт реализации контрактов, финансируемых международными организациями. Водоснабжение и санитарная техника. – №12. – 3-9.
4. Хенце М., Армоэс П., Ля-Кур-Янсен Й., Арван Э., 2004. Очистка сточных вод: Пер. с англ. – М.: Мир, – 480.
5. Худенко Б.М., Шпирт Е.А., 1973. Аэраторы для очистки сточных вод. М.: Стройиздат. – 112.
6. Щетинин А. И., Реготун А. А., 2000. Определение возможного качества очистки сточных вод активным илом при помощи программы «ЭкоСим». Водоснабжение и санитарная техника. – №12. ч. 2. – 18 – 19.
7. Щетинин А.И., Есин М.А., Есин А.М., 2007. Эффективность биологического удаления соединений азота и фосфора из сточных вод. Сб. докладов Международного конгресса «ЭТЭВК-2007». – 212-215.
8. Щетинин А.И., Есин М.А., Реготун А.А., Малбиев Б.Ю., 2010. Моделирование биохимических процессов очистки сточных вод как основа ретехнологизации сооружений. Водоснабжение и санитарная техника. — № 11.- 60-69.
9. Щетинин А.И., 2002. Особенности реконструкции городских очистных сооружений канализации в настоящий период. Вода экология: проблемы и решения. — №2. – 22-28.
10. Biowin™ a wastewater treatment system simulator. EnviroSim Associates LTD. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.envirosim.com/>.
11. Gujer W., Henze M., Mino T., Van Loosdrecht M., 1999. Activated Sludge Model No.3. Wat. Sci. Tech. — 39 (1). — 183-193.
12. Henze, M., Grady, C. P. L. Jr, Gujer, W, Marais, G. v. R., Matsuo, T., 1987. “Activated Sludge Model No.1”. IAWPRC Scientific and Technical Report No.1. London, UK: IAWPRC.
13. Henze M., Gujer W., Mino T., Matsuo T., Wentzel M. C., Marais G. v. R., Van Loosdrecht M., 1999. Activated Sludge Model No.2d. ASM2d. Wat. Sci. Tech. — 39 (1). 165-182.
14. Gujer, W., Henze, M., Mino, T., Van Loosdrecht M., 1999. “Activated Sludge Model No.3”. Wat. Sci. Tech. — 39(1). 183-193.
15. Hydromantis, in: GPS-X – Technical reference, GPS-x Version 5.0, 2006. Ontario, Canada. — 113.
16. Energy efficiency in municipal wastewater treatment plants. Technology assessment. Lawrence J. Pakenas, P.E., 2012. New York state, Energy research and development authority.
17. Energy reference guide. Lawrence J. Pakenas, P.E., 2012. New York state, Energy research and development authority. Wastewater treatment and sludge management.
18. Nutrient Control Design Manual. State of Technology Review Report, 2009. – U.S. Environmental Protection Agency. (EPA/600/R-09/012) – Cincinnati, OH 45268. — 102.
19. Rieger L., Koch G., Kuhni M., Gujer W., Siegrist H., 2001. The Eawag Bio-P Module for Activated Sludge Model No 3. Wat. Res. – 35 (18). – 3887-3903.
20. Shahriari H., Eskicioglu C., Droste R. L. 2006. Simulating Activated Sludge System by Simple-to-Advanced Models. Journal of Environmental Engineering. – Vol. 132. – №1. – 42-50.
21. WRc Group. Plan-it STOAT. wastewater modelling software. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.wrcplc.co.uk>.

MODERN ENERGY-SAVING DECISIONS IN PROCESSING OF WASTE WATER

Alexander Smirnov, Valentina Iurchenko, Michael Esin, Andrey Artemenko

Summary. The experience of company "Ekopolimer" on introduction of energy-saving decisions in the waste water treatment is analysed. These decisions allow for lower power consumption on clearing constructions on 65 %. The technological level of the modernization provides replacement of the pump and pressure-blowing equipment, installation aerators with high mass-transfer characteristics, technological – the realization of technology nitrification- denitrification, optimization - equipment of constructions by devices of the control, account and monitoring of waste water treatment process.

Key words: waste water, clearing constructions, biological clearing, power consumption, modernization.

НАДЕЖНОСТЬ ВОДОВОДОВ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Валерий Новохатний, Сергей Костенко

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка
Адрес: Украина, 36011, г Полтава, Первомайский проспект, 24
E-mail: kanc@pntu.edu.ua

Аннотация. В системе водоснабжения выделено три комплекса: водозаборный, водоочистной и подающе-распределительный. Изложен обоснованный метод выбора основных показателей надежности. Предложен метод и даны примеры расчета надежности водоводов.

Ключевые слова: системы водоснабжения, показатели надежности, надежность водоводов.

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие централизованного водоснабжения в Украине идет путем реконструкции и модернизации действующих водопроводных сооружений, для которых характерно высокое энергопотребление, значительный износ и низкая надежность. Однако, в теории водоснабжения в Украине до сегодняшнего дня не проведены современные научные исследования и не внедрены соответствующие математические методы, которые позволяли бы определить показатели надежности как отдельных сооружений, так и систем водоснабжения в целом.

С другой стороны, государственные “Правила предоставления услуг по централизованному отоплению, снабжению холодной и горячей водой и водоотведению” выдвинули требования по количественным и качественным показателям перечисленных услуг. Для централизованного водоснабжения предусмотрено бесперебойное снабжение потребителей водой, но допускаются перерывы в подаче воды длительностью не более 6-ти часов в сутки и не более 2-х раз в месяц. Эти требования могут быть выполнены только в том случае, когда подающе-распределительный комплекс системы водоснабжения (ПРК) будет иметь надежность не ниже сформулированных требований.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Основателем исследований надежности систем водоснабжения в бывшем СССР следует считать [1 – 6]. Значительного развития исследования надежности получили в работах [14, 15]. Однако, эти фундаментальные исследования были базой, но не смогли стать конкретными методиками инженерных расчетов надежности ввиду общности и сложности формул, взятых из теории надежности. Среди современных российских ученых следует назвать М.И. Алексева, Ю.А. Ермолина [7 – 9, 12], М.Г. Журбу [13], С.В. Храменкова [22], Е.М. Гальперина [11]. В Украине проблему надежности систем водоснабжения разрабатывают П.Д. Хоружый [21], А.А. Ткачук [20], А.Я. Найманов [16], В.Г. Новохатний [17 – 19].

Польские ученые активно исследуют проблему надежности систем водоснабжения, среди которых Н. Hołtoś, F. Piechurski, J.R. Rak, A. Studzinski, B. Tchórzewska-Cieślak [23 – 26] и другие. Анализ новейших исследований показал, что проблема надежности систем водоснабжения еще не решена до такого уровня, чтобы войти составной частью в технологические расчеты систем водоснабжения.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Каждая научная школа предлагает свои подходы к расчетам надежности водопроводных сооружений, но при этом мало внимания уделяется обязательным принципам решения этих задач.

Во-первых, перед расчетами показателей надежности надо сначала решить какие показатели следует использовать. Показателей надежности достаточно много, но надо выбрать основные для конкретных сооружений и разрабатывать методику расчета именно этих показателей.

Во-вторых, научные работники мало внимания обращают на точность исходных данных по надежности отдельных элементов водопроводных сооружений. В результате, точность полученных значений показателей надежности этих сооружений может значительно отличаться.

В-третьих, методики расчета надежности по своей сложности не должны превышать сложности гидравлических расчетов и только тогда расчеты надежности войдут в технологические расчеты водопроводных сооружений составной частью.

В одной статье невозможно изложить все разработанные методы расчета надежности водопроводных сооружений, поэтому целью данной работы были: классификация систем водоснабжения по надежности, изложение принципов выбора основных показателей надежности, разработка метода и примеров расчета надежности водоводов.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Выделение подающе-распределительного комплекса

В общем виде система водоснабжения представляет последовательную цепь взаимосвязанных и взаимодействующих сооружений (рис. 1). Подающее-распределительный

комплекс (ПРК) – это составная часть системы водоснабжения (аналогично комплексу водозаборных сооружений и комплексу очистных сооружений), которая обеспечивает подачу и распределение воды потребителям и объединяет резервуары и водонапорные башни, насосные станции, водоводы и водопроводную сеть (рис. 2).

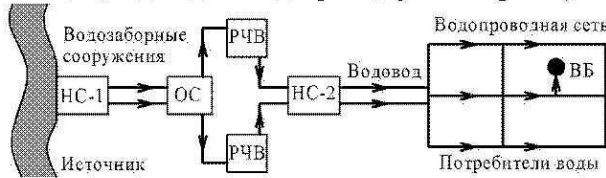


Рис. 1 Схема последовательной цепи взаимосвязанных водопроводных сооружений
Fig. 1 The scheme of the series chain interconnected water supply facilities

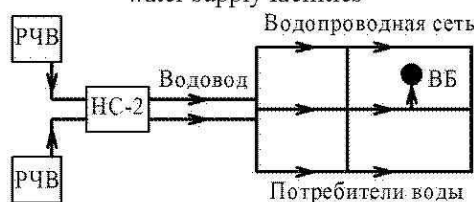


Рис. 2 Схема подающе-распределительного комплекса
Fig. 2 Scheme feeding-distribution complex

Надежность ПРК – это его свойство обеспечивать подачу, распределение воды соответствующего качества, в необходимом количестве, под требуемым напором всем потребителям воды в течении заданного времени и восстанавливать работоспособность после перерыва в подаче воды. Надежность ПРК $R_{ПРК}$ – это функция надежности отдельных сооружений, а именно – резервуаров и водонапорных башен, насосных станций, водоводов и водопроводной сети:

$$R_{ПРК} = f(R_{РЧВ}; R_{НС}; R_{Вод}; R_{ВС}), \quad (1)$$

где $R_{РЧВ}$; $R_{НС}$; $R_{Вод}$; $R_{ВС}$ – надежность резервуаров чистой воды, насосных станций, водоводов, водопроводной сети и водонапорных башен.

Деление потребителей на группы и категории

Системы водоснабжения работают на разных потребителей, которые выдвигают не одинаковые требования относительно уровня надежности обеспечения водой. Выбор основного показателя надежности специалисты в теории надежности рекомендуют выполнять, в первую очередь, с учетом последствий перерывов в подаче воды. С этой целью разделим всех потребителей воды на две группы, в зависимости от того, какой фактор является доминирующим при оценке последствий отказов. Факторов, которые принципиально отличаются, можно выделить только два.

Первый фактор – **опасность** отказа, независимо от продолжительности отказа, т.е. в этом случае определяющим есть факт отказа.

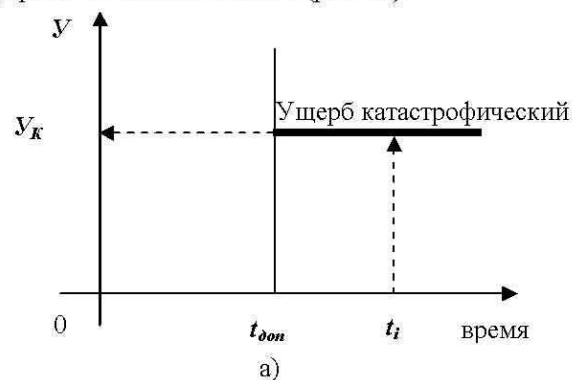
Второй фактор – **продолжительность** отказа; в этом случае определяющим есть время, на протяжении которого длился отказ.

Из всего множества потребителей воды выделим те из них, для которых отказ системы водоснабжения слишком опасен, потому что может привести к катастрофическим последствиям. Для таких потребителей чрезвычайной угрозой есть всего один отказ, а не время восстановления системы. Может быть и восстанавливать систему уже не имеет смысла, потому что катастрофические последствия привели, например, к гибели людей или экологической катастрофе. Объединим этих потребителей и системы водоснабжения, которых они обслуживают, в первую группу.

Первая группа – производства с непрерывным технологическим процессом в атомной энергетике, металлургии, химической, нефтехимической, медицинской промышленности, с применением взрывоопасных, сильнодействующих ядовитых веществ, ядерного, ракетного топлива.

Всех потребителей, которые не вошли в первую группу, отнесем ко **второй группе**. Отказы систем водоснабжения, которые обслуживают потребителей второй группы, не приводят к катастрофам, а только к материальным или моральным потерям, которые пропорциональны продолжительности и количеству перерывов. Потребители воды этой группы оговаривают только частоту и продолжительность этих перерывов.

Последствия отказов системы водоснабжения проявляются в виде ущербов, которые несет потребитель воды в случае отказов системы водоснабжения. Характер зависимости этих ущербов от перерывов в снабжении водой определяются тем, какой фактор является доминирующим при определении последствий отказов. За счет инертности систем водоснабжения существует некоторый промежуток времени в течении которого последствия отказа у потребителя не ощущаются (это может быть несколько минут). Назовем это время перерыва в водоснабжении допустимым $t_{дон}$. В случае превышения этого времени, у потребителя **первой группы** возникает опасная авария, которая приводит к катастрофе и соответствующим катастрофическим ущербам $У_K$ (рис. 3а). У потребителей **второй группы**, если перерыв в подаче воды превышает $t_{дон}$, катастроф не происходит, но потребитель несет потери, которые растут пропорционально продолжительности перерыва в снабжении водой (рис. 3б).



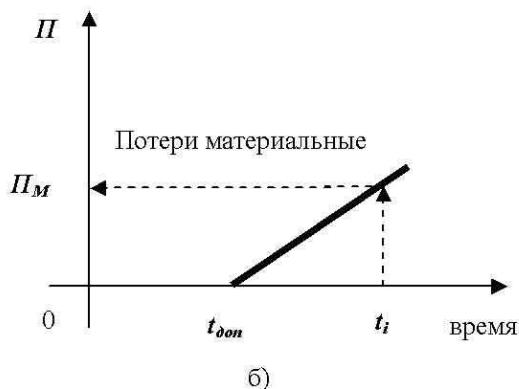


Рис. 3 Характер зависимости ущерба $У$ и материальных потерь $П$ от продолжительности перерыва в подаче воды для потребителей:

- а) первой группы;
- б) второй группы.

Fig. 3 The character of the dependence damage $У$ and material losses $П$ of the duration break in the supply of water to consumers:

- а) of a first group;
- б) of a second group.

Выбор основных показателей надежности

Отдельно взятые показатели надежности не дают возможности оценить экономическую полезность системы водоснабжения. Будем считать основным тот показатель надежности, который входит составной частью в экономический показатель, который оценивает экономическую полезность комплекса “система водоснабжения – потребитель”. В современных экономических условиях таким показателем можно принять годовой доход от эксплуатации этого комплекса. Учитывая то, что показатели надежности носят вероятностный характер, величина годового дохода также будет вероятностной. В качестве оценки примем среднее значение (математическое ожидание) дохода за один год эксплуатации комплекса.

Получим следующие выражения для среднегодового дохода $Д$:

– для потребителей **первой группы**:

$$Д = Д_0 t - У_K (1 - P(t)), \tag{2}$$

– для потребителей **второй группы**:

$$Д = Д_0 t - П_0 t_n (1 - K_T), \tag{3}$$

где t – продолжительность работы системы водоснабжения;

t_n – продолжительность простоя системы водоснабжения;

$У_K$ – катастрофический ущерб, в единицах стоимости, в случае отказа комплекса первой группы;

$П_0$ – материальные потери за единицу времени простоя комплекса второй группы в единицах стоимости;

$P(t)$ – вероятность безотказной работы системы водоснабжения в течение одного года для комплекса первой группы;

K_T – вероятность нахождения системы водоснабжения в работоспособном состоянии для комплекса второй группы, которая численно равна коэффициенту готовности.

Таким образом, в качестве количественной меры возникновения отказа для систем водоснабжения **первой группы** целесообразно взять вероятность возникновения отказа $Q(t)$ в течении времени работы t . Противоположная ей вероятность $P(t) = 1 - Q(t)$ представляет собой вероятность безотказной работы системы водоснабжения в течении времени t :

$$P(t) = P \{ t \geq t_i \}, \tag{4}$$

где t_i – произвольный отрезок времени.

Для систем водоснабжения **второй группы** целесообразно в качестве основного показателя надежности принять коэффициент готовности K_T или противоположный ему коэффициент простоя $K_П = 1 - K_T$. Коэффициент готовности K_T представляет собой “свертку” двух базисных показателей надежности – средней наработки на отказ T и среднего времени восстановления T_B :

$$K_T = \frac{T}{T + T_B}. \tag{5}$$

Коэффициент готовности – это комплексный показатель, который учитывает одновременно и безотказность (показатель T), и ремонтпригодность (показатель T_B) системы водоснабжения.

Потребителей воды в населенных пунктах следует отнести ко **второй группе** потребителей. “Правила предоставления услуг ...” допускают перерывы в подаче воды длительностью не более 6-ти часов в сутки и не более 2-х раз в месяц. Таким образом, безотказность системы водоснабжения должна быть такой, чтобы $T \geq 360 \text{ часов}$, а ремонтпригодность должна быть такой, чтобы $T_B \leq 6 \text{ часов}$. Тогда коэффициент готовности $K_T = 360 / (360 + 6) = 0,9836$.

На основе изложенных принципов предложена классификация и определены основные показатели надежности (табл. 1). При этом, коммунальные системы водоснабжения, которые обслуживают потребителей второй группы предлагается разделить на 3 категории.

Первая категория – города с числом жителей $N \geq 50000$ – допускаются перерывы водоснабжения не более 3-х часов в сутки и не чаще 1-го раза в 3 месяца. Такая норма была принята в Великобритании в 1985 г.

Вторая категория – города с числом жителей $10000 \leq N \leq 50000$ – допускаются перерывы водоснабжения не больше 6-ти часов в сутки и не чаще 2-х раз в месяц. Такая норма отвечает украинским требованиям.

Третья категория – поселки городского типа и села с числом жителей $N < 10000$ – допускаются

перерывы водоснабжения не более 24-х часов и не чаще 2-х раз в месяц.

Таблица 1 Классификация потребителей и систем водоснабжения по надежности

Группы потребителей	Группы и категории систем водоснабжения	Значения основных и базисных показателей надежности		
1	Первая группа Подгруппа А – системы водоснабжения опасных производств	Максимум вероятности безотказной работы на протяжении срока службы $\max P(T)$		
	Подгруппа Б – противопожарные системы водоснабжения	Максимум коэффициента оперативной готовности за 3 часа локализации пожара $\max K_{ог} = K_{г}P(t)$		
2	Вторая группа Централизованные водопроводы населенных пунктов при количестве жителей	Наработка на отказ T , час	Среднее время восстановления работоспособности $T_{в}$, час	Коэффициент готовности $K_{г}$
	1 категория города $N \geq 50$ тыс. жителей	$T \geq 360$ час (0,5 месяца)	$T_{в} \leq 3$ часа	0,99861
	2 категория города 10 тыс. $\leq N \leq 50$ тыс. жителей	$T \geq 360$ час (0,5 месяца)	$T_{в} \leq 6$ часов	0,98361
	3 категория пгт. и села $N < 10$ тыс. жителей	$T \geq 360$ час (0,5 месяца)	$T_{в} \leq 24$ часа	0,93750

Надежность водоводов

Покажем, как можно рассчитать основные показатели надежности для водоводов – одного из сооружений ПРК. Водоводом в системе водоснабжения будем считать трубопровод, который состоит из одной или нескольких параллельно проложенных труб (ниток), которые транспортируют воду транзитом, т.е. без путевого разбора воды. Однако, возможны узловые отборы воды и тогда диаметры труб на отдельных участках водовода могут уменьшаться по направлению движения воды. Обычно водоводом вода подается от:

- водозаборных сооружений с поверхностного источника на очистные сооружения;
- скважин из подземных источников на очистные сооружения или в резервуары чистой воды;
- водопроводных очистных сооружений в водопроводную сеть населенного пункта, в том числе в групповых и районных водопроводах;
- внеплощадочных водопроводных сооружений на площадку промышленного предприятия.

Водовод, который состоит из одной нитки трубопровода назовем **простым**, а который состоит из 2-х и более ниток – **сложным**.

Основные показатели надежности рассчитываем на основе базисных показателей надежности T и $T_{в}$. Для водоводов, которые подают воду потребителям **первой группы**, основной показатель надежности – вероятность безотказной работы в течении времени t :

$$P(t) = \exp\left[-\frac{t}{T}\right] = \exp[-\omega t], \quad (6)$$

где T – средняя наработка на отказ водовода; ω – параметр потока отказов водовода.

Для водоводов, которые подают воду потребителям **второй группы**, основной показатель надежности – коэффициент готовности:

$$K_{г} = \frac{T}{T + T_{в}}. \quad (7)$$

Рассмотрим простой водовод, который состоит из нескольких участков разной длины и диаметра труб (рис. 5).

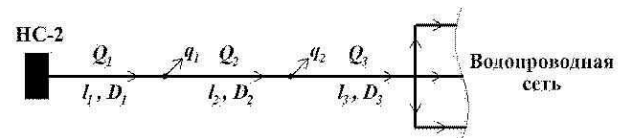


Рис. 5 Схема простого водовода
Fig. 5 Scheme of a simple conduit

Математической моделью для расчета надежности в этом случае будет последовательное соединение восстанавливаемых элементов. Элементом принимаем 1 км трубопровода фиксированного диаметра и материала труб. **Параметр потока отказов** водовода рассчитываем как для последовательно соединенных элементов:

$$\omega = \sum_{i=1}^n \omega_{oi} l_i = \sum_{i=1}^n \omega_i, \quad (8)$$

где l_i – длина участка трубопровода i -го диаметра, км; ω_{oi} – удельный параметр потока отказов – параметр потока отказов 1 км трубопровода i -го диаметра и материала труб, 1/год·км; n – количество участков трубопровода разного диаметра и материала труб.

Средняя наработка на отказ водовода:

$$T = 1/\omega, \text{ лет.} \quad (9)$$

Среднее время восстановления работоспособности водовода рассчитываем как средневзвешенную, относительно параметра потока отказов участков, величину:

$$T_{в} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i T_{ви}}{\sum_{i=1}^n \omega_i} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i T_{ви}}{\omega}, \quad (10)$$

где $\omega_i = \omega_{oi} l_i$ – параметр потока отказов i -го участка водовода; $T_{ви}$ – среднее время восстановления работоспособности i -го участка.

Рассмотрим сложный водовод, который состоит из 2-х одинаковых ниток без перемычек (рис. 6).

По условию задачи $l_1 = l_2; D_1 = D_2; \omega_1 = \omega_2; T_{B1} = T_{B2}$. Критерий отказа – прекращение подачи воды водоводом. Подача воды одной ниткой водовода не считается отказом. Воспользуемся методом вкладов, разработанным в теории надежности [10], при котором вычисляются “вклады” всех элементов в общий поток отказов.

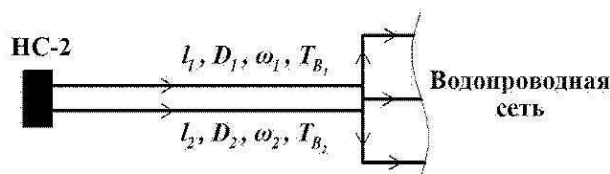


Рис. 6 Схема сложного водовода из 2-х одинаковых ниток

Fig. 6 Scheme of a complex conduit from 2 identical threads

Отказ первой нитки водовода не приводит к отказу водовода, но отказ водовода может произойти, если в это время в ремонте находится вторая нитка. Тогда вклад первой нитки составляет:

$$v_1 = \omega_1 K_{\Pi 2}, \quad (11)$$

где $K_{\Pi 2} = \omega_2 T_{B2}$ – коэффициент простоя второй нитки, который определяет вероятность того, что вторая нитка находится в ремонте.

Аналогично, вклад второй нитки v_2 в параметр потока отказов водовода равен $v_2 = \omega_2 K_{\Pi 1}$. Параметр потока отказов водовода находится как сумма вкладов обеих ниток:

$$\omega = v_1 + v_2 = \omega_1 K_{\Pi 2} + \omega_2 K_{\Pi 1} = 2\omega_1 K_{\Pi 2}. \quad (12)$$

Средняя наработка на отказ:

$$T = 1/(v_1 + v_2). \quad (13)$$

Среднее время восстановления работоспособности водовода:

$$T_B = \frac{v_1 T_{B1} + v_2 T_{B2}}{v_1 + v_2} = T_{B1} = T_{B2}. \quad (14)$$

И.А. Ушаков доказывает [10], что точность расчетов базисных показателей надежности методом вкладов достаточно высокая в том случае, когда интервалы простоев значительно меньше интервалов безотказной работы. Это условие выполняется для водоводов, у которых отношение T_B/T составляет 0,005 ... 0,01.

Рассмотрим водовод, который состоит из 2-х ниток с высоконадежной перемычкой. Нитки могут быть из труб одинакового или разного диаметра и материала, участки могут быть разной длины – все это не влияет на вид формул. Примем критерием отказа прекращение подачи воды водоводом. Подача воды по одной нитке водовода или с

неработающим участком, без прекращения подачи воды, не считается отказом (рис. 7).

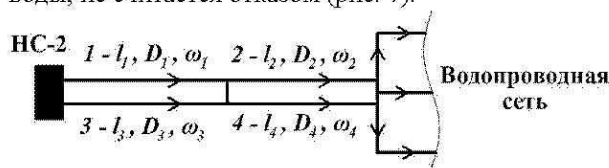


Рис. 7 Схема водовода из 2-х ниток с перемычкой
Fig. 7 Scheme conduit of 2 threads with jumper

Вычисляем вклады участков в параметр потока отказов водовода:

$$v_1 = \omega_1 K_{\Pi 3}, \quad v_3 = \omega_3 K_{\Pi 1}, \quad (15)$$

$$v_2 = \omega_2 K_{\Pi 4}, \quad v_4 = \omega_4 K_{\Pi 2}.$$

Параметр потока отказов водовода:

$$\omega = \sum_{i=1}^4 v_i. \quad (16)$$

Средняя наработка на отказ водовода:

$$T = 1/\omega. \quad (17)$$

Среднее время восстановления работоспособности водовода:

$$T_B = \frac{v_1 T_{B1} + v_2 T_{B2} + v_3 T_{B3} + v_4 T_{B4}}{v_1 + v_2 + v_3 + v_4}, \quad (18)$$

где $T_{B1}, T_{B2}, T_{B3}, T_{B4}$ – среднее время восстановления работоспособности соответствующих участков водовода.

Если $T_{B1} = T_{B2} = T_{B3} = T_{B4}$, тогда

$T_B = T_{B1}$, то есть, среднее время восстановления работоспособности водовода равно среднему времени восстановления работоспособности участка водовода.

Аналогичные формулы для расчета базисных показателей надежности можно получить для водовода из 2-х ниток с 2-мя высоконадежными перемычками (рис. 8).

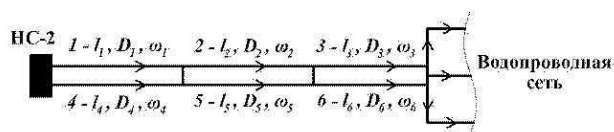


Рис. 8 Схема водовода из 2-х ниток с 2-мя перемычками

Fig. 8 Scheme conduit of 2 threads with 2 jumpers

Критерий отказа – прекращение подачи воды водоводом. Подача по одной нитке или отключенными в ремонт участками, без прекращения подачи воды, не считается отказом. Вклады участков в параметр потока отказов водовода:

$$v_1 = \omega_1 K_{\Pi 4}, \quad v_3 = \omega_3 K_{\Pi 6}, \quad v_5 = \omega_5 K_{\Pi 2}, \quad (19)$$

$$v_2 = \omega_2 K_{\Pi 5}, \quad v_4 = \omega_4 K_{\Pi 1}, \quad v_6 = \omega_6 K_{\Pi 3}.$$

Параметр потока отказов водовода:

$$\omega = \sum_{i=1}^6 v_i \quad (20)$$

Средняя наработка на отказ водовода:

$$T = 1/\omega. \quad (21)$$

Среднее время восстановления работоспособности водовода:

$$T_B = \frac{v_1 T_{B_1} + v_2 T_{B_2} + v_3 T_{B_3} + v_4 T_{B_4} + v_5 T_{B_5} + v_6 T_{B_6}}{v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + v_5 + v_6}. \quad (22)$$

Рассмотрим пример расчета базисных показателей надежности такого водовода (рис. 9). Пусть участки 1, 2, 4, 5 выполнены из стальных труб ($\omega_0 = 1,2 \text{ 1/год}\cdot\text{км} = 1,37 \cdot 10^{-4} \text{ 1/час}\cdot\text{км}$), а участки 3, 6 выполнены из полиэтиленовых труб ($\omega_0 = 0,44 \text{ 1/год}\cdot\text{км} = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/час}\cdot\text{км}$). Пусть среднее время восстановления стальных труб $T_{BC} = 12 \text{ часов}$, полиэтиленовых труб $T_{PI} = 10 \text{ часов}$.

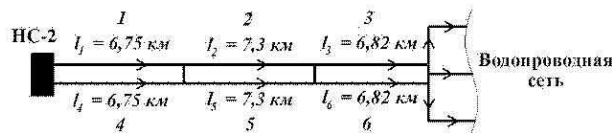


Рис. 9 Схема для примера расчета надежности водовода из 2-х ниток с 2-мя высоконадежными перемычками

Fig. 9 Scheme for example calculating the reliability of the conduit 2 threads with 2 highly reliable jumpers

Вычисляем параметр потока отказов участков:

$$\omega_1 = \omega_4 = \omega_0 l_1 = 1,37 \cdot 10^{-4} \cdot 6,75 = 9,25 \cdot 10^{-4} \text{ 1/час},$$

$$\omega_2 = \omega_5 = \omega_0 l_2 = 1,37 \cdot 10^{-4} \cdot 7,3 = 10,0 \cdot 10^{-4} \text{ 1/час},$$

$$\omega_3 = \omega_6 = \omega_0 l_3 = 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot 6,82 = 3,41 \cdot 10^{-4} \text{ 1/час}.$$

Вычисляем коэффициент простоя участков:

$$K_{\pi_1} = K_{\pi_4} = \omega_1 T_{BC} = 9,25 \cdot 10^{-4} \cdot 12 = 1,11 \cdot 10^{-2},$$

$$K_{\pi_2} = K_{\pi_5} = \omega_2 T_{BC} = 10,0 \cdot 10^{-4} \cdot 12 = 1,2 \cdot 10^{-2},$$

$$K_{\pi_3} = K_{\pi_6} = \omega_3 T_{PI} = 3,41 \cdot 10^{-4} \cdot 10 = 0,34 \cdot 10^{-2}.$$

Вычисляем вклады участков:

$$v_1 = \omega_1 K_{\pi_1} = 9,25 \cdot 10^{-4} \cdot 1,11 \cdot 10^{-2} = 1,03 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час},$$

$$v_2 = \omega_2 K_{\pi_2} = 10,0 \cdot 10^{-4} \cdot 1,2 \cdot 10^{-2} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час},$$

$$v_3 = \omega_3 K_{\pi_3} = 3,41 \cdot 10^{-4} \cdot 0,34 \cdot 10^{-2} = 0,12 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час},$$

$$v_4 = \omega_4 K_{\pi_1} = 9,25 \cdot 10^{-4} \cdot 1,11 \cdot 10^{-2} = 1,03 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час},$$

$$v_5 = \omega_5 K_{\pi_2} = 10,0 \cdot 10^{-4} \cdot 1,2 \cdot 10^{-2} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час},$$

$$v_6 = \omega_6 K_{\pi_3} = 3,41 \cdot 10^{-4} \cdot 0,34 \cdot 10^{-2} = 0,12 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час}.$$

Параметр потока отказов водовода:

$$\omega = \sum_{i=1}^6 v_i = 4,7 \cdot 10^{-5} \text{ 1/час}.$$

Нарработка на отказ водовода:

$$T = 1/\omega = 21276 \text{ час} = 2,43 \text{ года}.$$

Среднее время восстановления работоспособности водовода:

$$T_B = \frac{(1,03 \cdot 12 + 1,2 \cdot 12 + 0,12 \cdot 10 + 1,03 \cdot 12 + 1,2 \cdot 12 + 0,12 \cdot 10) \cdot 10^{-5}}{(1,03 + 1,2 + 0,12 + 1,03 + 1,2 + 0,12) \cdot 10^{-5}} = 11,9 \text{ часа}.$$

Таким образом, водовод будет отказывать примерно 1 раз в 2,5 года на время примерно 12 часов.

Вероятность безотказной работы водовода в течении года:

$$P(t) = \exp[-4,7 \cdot 10^{-4} \cdot 8760] = e^{-0,412} = 0,6623.$$

Коэффициент готовности водовода:

$$K_G = \frac{21276}{21276 + 11,9} = 0,99944.$$

Коэффициент простоя водовода:

$$K_{II} = 1 - K_G = 0,00056.$$

Алгоритм расчета надежности водовода при высоконадежных перемычках.

1. Разрабатывается технологическая схема водовода.
2. Формируется критерий отказа водовода. Отказом считается прекращение подачи воды водоводом или другое условие.
3. Определяется параметр потока отказов ω_i каждого участка водовода по формуле:

$$\omega_i = \omega_0 l_i, \text{ 1/час}, \quad (23)$$

где l_i – длина участка, км; ω_0 – удельный параметр потока отказов, 1/год·км.

4. Определяются коэффициенты простоя участков водовода по формуле:

$$K_{\pi j} = \omega_j T_{Bj}, \quad (24)$$

где T_{Bj} – среднее время ремонта участка, час.

5. Вычисляются вклады участков v_i в параметр потока отказов водовода:

$$v_i = \omega_i K_{\pi j}, \text{ 1/час}, \quad (25)$$

где ω_i – параметр потока отказов i -го участка, 1/час; $K_{\pi j} = \omega_j T_{Bj}$ – коэффициент простоя j -го участка.

6. Вычисляется параметр потока отказов водовода как сумма вкладов отдельных участков:

$$\omega = \sum_{i=1}^n v_i, \text{ 1/час}, \quad (26)$$

где n – количество участков водовода.

7. Вычисляется средняя наработка на отказ водовода:

$$T = 1/\omega, \text{ часов}. \quad (27)$$

8. Вычисляется среднее время восстановления работоспособности водовода как средневзвешенная, относительно вкладов, величина:

$$T_B = \frac{\sum_{i=1}^n v_i T_{B_i}}{\sum_{i=1}^n v_i}, \text{ час,} \quad (28)$$

где T_{B_i} – среднее время восстановления i -го участка водовода, час.

9. Вычисляется основной показатель надежности:

– для водоводов **первой** группы – **вероятность безотказной работы** в течении времени t :

$$P(t) = \exp[-\omega t], \quad (29)$$

– для водоводов **второй** группы – **коэффициент готовности**:

$$K_r = \frac{T}{T + T_B}, \quad (30)$$

или **коэффициент простоя** $K_{II} = 1 - K_r$. (31)

Обычно водоводы состоят из линейной части (трубы) и запорной и предохранительной арматуры (задвижки, клапаны, вантузы и др.). Если водовод проложен в две и больше параллельных ниток, то между ними устраивают перемычки, которые оборудуют задвижками для переключений. При этом, нормами разрешается уменьшить подачу воды только на 30%. Это можно сделать двумя путями:

– принять водовод в две нитки без перемычек на подачу воды $0,7Q$ каждой ниткой, что экономически выгодно только при коротких водоводах;

– принять водовод в две нитки с перемычками на подачу воды $0,5Q$ каждой нитки, когда при повреждениях отключается отдельный участок.

Рассмотрим схему водовода в две нитки с двумя перемычками и задвижками (рис. 10). Критерий отказа – прекращение подачи воды, или подача воды одной ниткой, или подача воды при двух выключенных участках.

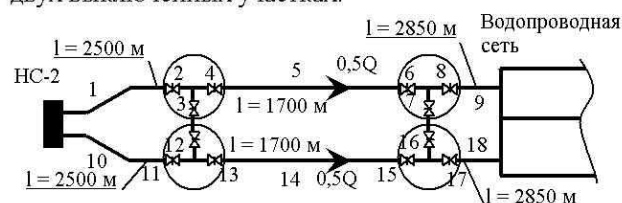


Рис. 10 Схема водовода в 2 нитки с 2-мя перемычками

Fig. 10 Scheme conduit in 2 threads with 2 jumpers

С точки зрения надежности, для принятого критерия отказа все задвижки на водоводе оказываются соединенными последовательно. Вызвано это тем, что отказ любой задвижки ведет к отключению двух участков, а для сохранения работоспособного состояния допускается отключение только одного участка. Под отказом задвижки считаем такое ее состояние, когда нужна

ее срочная замена (например, повреждение корпуса).

Для принятого критерия отказа работоспособными состояниями водовода будут только те состояния, когда работоспособны все участки или отказал только один участок (рис. 11).

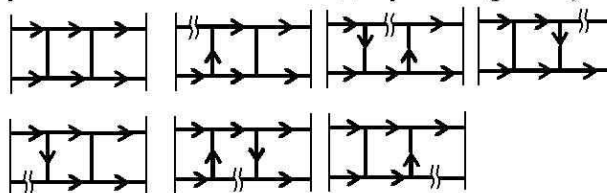


Рис. 11 Работоспособные состояния водовода в 2 нитки с 2-мя перемычками

Fig. 11 Operable condition of the conduit in 2 threads with 2 jumpers

Определим вклады элементов в параметр потока отказов водовода:

$$v_1 = \omega_1 (K_{II_5} + K_{II_9} + K_{II_{10}} + K_{II_{14}} + K_{II_{18}}),$$

$$v_5 = \omega_5 (K_{II_1} + K_{II_9} + K_{II_{10}} + K_{II_{14}} + K_{II_{18}}),$$

$$v_9 = \omega_9 (K_{II_1} + K_{II_5} + K_{II_{10}} + K_{II_{14}} + K_{II_{18}}),$$

$$v_{10} = \omega_{10} (K_{II_1} + K_{II_5} + K_{II_9} + K_{II_{14}} + K_{II_{18}}),$$

$$v_{14} = \omega_{14} (K_{II_1} + K_{II_5} + K_{II_9} + K_{II_{10}} + K_{II_{18}}),$$

$$v_{18} = \omega_{18} (K_{II_1} + K_{II_5} + K_{II_9} + K_{II_{10}} + K_{II_{14}}),$$

$$v_2 = \omega_2; v_3 = \omega_3; v_4 = \omega_4; v_6 = \omega_6,$$

$$v_7 = \omega_7; v_8 = \omega_8; v_{11} = \omega_{11}; v_{12} = \omega_{12},$$

$$v_{13} = \omega_{13}; v_{15} = \omega_{15}; v_{16} = \omega_{16}; v_{17} = \omega_{17}.$$

Примем для стальных труб $\omega_0 = 1,4$ 1/год·км; для задвижек $\omega = 0,15 \cdot 10^{-4}$ 1/час; среднее время ремонта участка трубопровода $T_B = 8$ час.

Параметры потока отказа участков:

$$\omega_1 = \omega_{10} = \omega_0 l = 1,4 \cdot 2,5 = 3,5 \text{ 1/год} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ 1/час,}$$

$$\omega_5 = \omega_{14} = \omega_0 l = 1,4 \cdot 1,7 = 2,38 \text{ 1/год} = 2,72 \cdot 10^{-4} \text{ 1/час,}$$

$$\omega_9 = \omega_{18} = \omega_0 l = 1,4 \cdot 2,5 = 3,99 \text{ 1/год} = 4,55 \cdot 10^{-4} \text{ 1/час.}$$

Коэффициент простоя участков:

$$K_{II_1} = K_{II_{10}} = \omega \cdot T_B = 4 \cdot 10^{-4} \cdot 8 = 3,2 \cdot 10^{-3},$$

$$K_{II_5} = K_{II_{14}} = \omega \cdot T_B = 2,72 \cdot 10^{-4} \cdot 8 = 2,18 \cdot 10^{-3},$$

$$K_{II_9} = K_{II_{18}} = \omega \cdot T_B = 4,55 \cdot 10^{-4} \cdot 8 = 3,64 \cdot 10^{-3}.$$

Вклады элементов в параметр потока отказов водовода:

$$v_1 = v_{10} = 4 \cdot 10^{-4} (2,18 + 3,64 + 3,2 + 2,18 + 3,64) 10^{-3} = 5,94 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час,}$$

$$v_5 = v_{14} = 2,72 \cdot 10^{-4} (3,2 + 3,64 + 3,2 + 2,18 + 3,64) 10^{-3} = 4,31 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час,}$$

$$v_9 = v_{18} = 4,55 \cdot 10^{-4} (3,2 + 2,18 + 3,64 + 3,2 + 2,18) 10^{-3} = 6,55 \cdot 10^{-6} \text{ 1/час,}$$

$$v_2 = \dots = v_{17} = \omega_2 \dots = \omega_{17} = 0,15 \cdot 10^{-4} \text{ 1/час.}$$

Параметр потока отказов водовода:

$$\omega = \sum_{i=1}^{18} v_i = (2 \cdot 5,94 + 2 \cdot 4,31 + 2 \cdot 6,55) \cdot 10^{-6} +$$

$$+ 12 \cdot 0,15 \cdot 10^{-4} = 2,136 \cdot 10^{-4} \text{ 1/час.}$$

Наработка на отказ водовода:

$$T = \frac{1}{\omega} = \frac{1}{2,136 \cdot 10^{-4}} = 4682 \text{ час} \approx 0,53 \text{ года.}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Н.Н., 1972. Теория и методика расчета систем подачи и распределения воды. – М.: Стройиздат. – 288.
2. Абрамов Н.Н. О проблемах надежности систем водоснабжения // Водные ресурсы. – 1974. – №2. – 114 – 119
3. Абрамов Н.Н., Малов В.И. О надежности систем водоснабжения и путей ее обеспечения // Известия АН СРСР. Энергетика и транспорт. – 1976. – №1. – 161 – 176
4. Абрамов Н.Н., 1984. Надежность систем водоснабжения. – М.: Стройиздат. – 216.
5. Абрамов Н.Н., 1979. Надежность систем водоснабжения. – М.: Стройиздат. – 231.
6. Абрамов Н.Н., 1982. Водоснабжение: [учебник]. – М.: Стройиздат. – 440.
7. Алексеев М.И., Ермолин Ю.А. Использование оценки надежности стареющих канализационных сетей при их реконструкции // Водоснабжение и санитарная техника. – 2004. – №6. – 21 – 23
8. Алексеев М.И., Ермолин Ю.А., Определение показателей надежности объекта по сезонно изменяющейся интенсивности отказов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2007. – №5. 5 – 8
9. Алексеев М.И., Ермолин Ю.А., Вероятностные характеристики времени наработки между отказами восстанавливаемых объектов водопроводно-канализационного хозяйства // Водоснабжение и санитарная техника. – 2009. – №5 – 26 – 28
10. Беляев Ю.К., Богатырев В.А., Болотин В.В. и др., 1985. Надежность технических систем: Справочник. – М.: Радио и связь. – 608.
11. Гальперин Е.М. Совершенствование расчетной модели функционирования кольцевой водопроводной сети // Водоснабжение и санитарная техника. – 2010. – №2. – 51 – 54
12. Ермолин Ю.А., Алексеев М.И. О методологии исследования надежности стареющих элементов и систем водопровода и канализации // Водоснабжение и санитарная техника. – 2002. – №9. – 2 – 4
13. Журба М.Г., Соколов Л.И., Говорова Ж.М., 2010. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: в 3-х т. Т. 1. Системы водоснабжения, водозаборные сооружения: Учеб. пособие. – М.: Из-во АСВ. – 400.
14. Ильин Ю.А., 1985. Надежность водопроводных сооружений и оборудования. – М.: Стройиздат. – 240.
15. Ильин Ю.А., 1987. Расчет надежности подачи воды. – М.: Стройиздат. – 320.
16. Найманов А.Я. О надежности систем водоснабжения и водоотведения // Водоснабжение и санитарная техника. – 2005. – №7. – 30 – 35.
17. Новохатний В.Г., 2012. Надійність функціонування подавально-розподільного комплексу систем водопостачання: автореф. дис. докт. техн. наук. – К.: КНУБА. – 32.
18. Новохатний В.Г. Надійність подавально-розподільного комплексу систем водопостачання // Наук. вісник будівництва: 36. наук. праць. Вип. 48. – Харків: ХДТУБА. – 2010. – 36 – 42
19. Новохатний В.Г., Костенко С.О. Оцінювання надійності охолоджувальних систем обігового водопостачання сталеливарного заводу // Наук. вісник будівництва: 36. наук. праць. Вип. 72. – Харків: ХНУБА. – 2013. – 350 – 354
20. Ткачук О.А., 2008. Удосконалення систем подачі та розподілення води населених пунктів. – Рівне: НУВГП. – 301.
21. Хоружий П.Д., Хомуцька Т.П., Хоружий В.П., 2008. Ресурсозберігаючі технології водопостачання. – К.: Аграрна наука. – 534.
22. Храменков С.В., 2005. Стратегия модернизации водопроводной сети. – М.: ОАО Из-во “Стройиздат”. – 400.
23. Hotłoś H. Analiza strat wody w systemach wodociagowych // Ochrona Srodowiska. – 2003. – №1. – 17 – 24
24. Piechurski F. Straty wody i sposoby ich obnizania // Ochrona Srodowiska. – 2/2005, 4/2005, 1/2006, 2/2006.
25. Rak J., Tchorzewska-Cieślak B. Metody analizy i oceny ryzyka w systemie zaopatrzenia w wodę. - Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2005.
26. Rak J. Podstawy bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę. – Komitet Inzynierii Srodowiska PAN. – T. 28. – Lublin, 2005. – 1 – 215.

RELIABILITY OF CONDUITS OF WATER SUPPLY SYSTEMS

Summary. In the water supply systems allocated three complexes: water intake, water treatment and feeding-distribution. Set out a reasonable method for selecting key indicators of reliability. We propose a method and gives examples of calculating the reliability of conduits.

Key words: system of water supply, indicators reliability, reliability of conduits.

ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД МЯСОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Виктор Ковальчук

Национальный университет водного хозяйства и природопользования
Адрес: Украина, г. Ровно, ул. Соборная, 11
E-mail: kvant56@list.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований технологии физико-химической и биологической очистки сточных вод мясоперерабатывающих предприятий.

Ключевые слова: мясоперерабатывающие предприятия, сточные воды, отстойник-флотатор, аэротенк-отстойник, технология очистки сточных вод.

ВЕДЕНИЕ

Годовое производство мяса различных категорий в Украине составляет около 2,4 млн. тонн и постоянно увеличивается [2]. Расход сточных вод, образующихся при этом, составляет около 40 млн. м³ в год, что по количеству загрязнений соответствует примерно 400 млн. м³ городских сточных вод.

Сточные воды мясоперерабатывающих предприятий (МПП) содержат кровь, остатки внутренностей, мышечных и жировых тканей, навоз, землю, песок, грязь, специи и дезинфицирующие вещества, используемые в производстве. Они высококонцентрированы по ХПК и БПК, содержанию взвешенных веществ и жиров, имеют повышенное содержание биогенных элементов [15].

Образование на МПП большого количества высококонцентрированных сточных вод и недостаточная эффективность применяемых методов и технологий их очистки создают значительную угрозу окружающей среде [9].

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

В сточных водах МПП жиры находятся в основном в грубодисперсном и эмульсированном состоянии, содержание растворимых жиров составляет лишь несколько миллиграммов на кубический дециметр. Основная масса грубодисперсных жиров легко удаляется из сточных вод простым отстаиванием. Однако, эмульсированные жиры, содержащиеся в сточных водах: - образуют пленку на поверхности хлопьев активного ила, биопленки и загрузки биологических фильтров; - уменьшают массопередачу субстрата, кислорода и продуктов биохимических реакций, - вызывают вспухание активного ила; - способствуют развитию нитчатых микроорганизмов. Это приводит к выходу из строя биологических фильтров, а вследствие существенного уменьшения скорости окисления загрязнений активным илом - к

значительным осложнениям в работе аэротенков. Уменьшение скоростей биохимического окисления при этом происходит вследствие малой скорости ферментативного гидролиза жиров, продукты которого, однако, хорошо окисляются микроорганизмами [14, 15, 18, 19].

Наиболее эффективным методом удаления жиров и взвешенных веществ из сточных вод МПП является флотация. Применение импеллерной флотации обеспечивает наименьшую эффективность удаления взвешенных веществ и жиров среди всех методов флотационной очистки. Несколько эффективнее пенная сепарация, однако, она не применяется из-за большого количества (до 22%) образующегося флотошлама. Электрофлотация, электрокоагуляция и электрофлотокоагуляция не находят применения из-за значительных затрат электроэнергии, недолговечности электродов и их пассивации, загрязнения ионами металлов образующихся осадков и шламов, сложности эксплуатации электроустановок. Наилучшие результаты достигаются при напорной флотации с предварительной коагуляцией, однако она не обеспечивает степень очистки, достаточную для сброса очищенных сточных вод в городские канализации, требует значительного расхода реагентов, приводит к образованию большого объема осадков и шламов. Этот метод имеет ограниченное применение, что обуславливает целесообразность использования для очистки сточных вод МПП безреагентной напорной флотации [15, 16, 20].

Самостоятельная анаэробная биологическая очистка также не обеспечивает степень извлечения органических загрязнений из сточных вод МПП, достаточный для их сброса в городские канализации, и, одновременно, приводит к существенному увеличению концентраций аммонийного азота [21]. Это значительно затрудняет последующую аэробную биологическую очистку и возможность удаления аммонийного азота из сточных вод путем нитрификации-денитрификации, поскольку при низких концентрациях органических веществ аммонийный азот является ингибитором процесса аэробного

биологического окисления загрязнений [1]. Кроме этого, анаэробно сброженные сточные воды имеют неприятный запах, а сооружения требуют устройства значительных противопожарных разрывов, что является недостатком их строительства на пищевых предприятиях. Наиболее приемлемым методом извлечения растворенных и коллоидных веществ из сточных вод МПП является их биологическая очистка в аэротенках, однако в отечественной и зарубежной нормативной, справочной и научной литературе практически отсутствуют данные о скоростях биохимического окисления загрязнений активным илом.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Разрабатываемая технология должна обеспечивать необходимую степень очистки сточных вод всех типов МПП, быть энергосберегающей и простой в эксплуатации.

Существующие МПП Украины могут быть разделены на четыре группы: 1) старые мясокомбинаты, работающие по технологиям с полной переработкой субпродуктов и конфискатов; 2) старые мясокомбинаты, перешедшие на частичную переработку субпродуктов с переработкой конфискатов на ветсанзаводах, а также старые мясоперерабатывающие заводы, колбасные фабрики и птице-мясокомбинаты, 3) новые предприятия с частичной переработкой субпродуктов и переработкой конфискатов на ветсанзаводах 4) убойные цеха птицефабрик. Различные производственные программы и степень переработки мясного сырья обуславливают отличающиеся уровни загрязнения сточных вод рассмотренных групп МПП.

По допустимым концентрациям взвешенных веществ, БПК_{полн.}, БПК₅ и ХПК для сброса сточных вод МПП в канализации городов Украины приемлема неполная биологическая очистка. Однако ее эффективность должна устанавливаться, исходя из необходимости осуществления биологической нитрификации аммонийного азота (остаточные концентрации 2,5-35 мг/дм³) и окисления тонко эмульсированных жиров (остаточные концентрации 4,4-50 мг/дм³). Жесткие требования по содержанию в очищенных сточных водах нитритов (в некоторых случаях - до 0,01 мг/дм³) и нитратов (в некоторых случаях - до 5 мг/дм³) указывают на необходимость осуществления еще и процессов денитрификации. В случае сброса в открытые водоемы, по показателям ХПК, БПК_{полн.}, БПК₅ и концентрации взвешенных веществ необходимо обеспечивать степень полной биологической очистки с глубокой доочисткой. При этом должны соблюдаться требования к эффективности очистки по таким показателям, как содержание аммонийного азота (до 0,5-1 мг/дм³), нитритов (до 0,01-0,42 мг/дм³) и нитратов (до 1-40

мг/дм³), фосфатов (до 3,12-4 мг/дм³) и железа (до 0,18-0,3 мг/дм³), нефтепродуктов (до 0,01-0,5 мг/дм³) и СПАВ (до 0,2 мг/дм³). Жиры в очищенных сточных водах должны отсутствовать.

Для предварительной очистки сточных вод МПП предложена технология, предусматривающая удаление крупных отбросов на решетках, песка и других крупных минеральных примесей в песколовках, основной массы взвешенных веществ и жиров - в отстойниках-флотаторах, коллоидных и растворенных органических примесей - в аэротенках-отстойниках со струйной аэрацией [10, 11]. Для глубокой очистки сточных вод МПП за основу может быть взята технологическая схема очистки, рассчитанная на сброс сточных вод в городские канализации. Однако в ней должна быть применена двухступенчатая полная биологическая очистка и глубокая доочистка сточных вод на фильтрах с плавающей пенополистирольной загрузкой. Значительное содержание жиров в осадках сточных вод МПП обуславливает целесообразность применения для их обезвоживания центрифуг.

Задачу настоящих исследований составила экспериментальная проверка работы предложенных сооружений и технологических схем очистки сточных вод различных МПП в условиях действующего производства.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Производственные исследования выполняли на Черниговском, Белоцерковском, Новгород-Северском и Неженском мясокомбинатах, мясоперерабатывающем комплексе «Росана», убойных цехах птицефабрики «Ориль-Лидер» и Морозовской птицефабрики, для которых по предложенной технологии были разработаны проекты и построены очистные сооружения.

В ходе исследований было экспериментально подтверждено, что состав и свойства сточных вод МПП определяются применяемыми на предприятиях технологиями переработки мяса, субпродуктов и конфискатов (таблица 1). Режим водоотведения на предприятиях отличается значительной неравномерностью и определяется, главным образом, наличием сырья.

Интенсификация процесса безреагентной напорной флотационной очистки сточных вод достигалась применением разработанных вертикальных металлических отстойников-флотаторов диаметрами 2,4, 4,0, 6,0 и 7,2 м (рисунок 1) [5]. Это позволило: - увеличить общую эффективность извлечения взвеси за счет предварительного кратковременного осаждения наиболее крупных частиц, которые плохо флотируются; - обеспечить наиболее эффективный контакт твердой фазы с пузырьками воздуха за счет увеличения размера флотационной камеры в направлении силового (гравитационного) поля; -

Таблица 1. Характеристика сточных вод различных групп мясоперерабатывающих предприятий

Table 1. Wastewater characterization of different groups of meat-processing plants

Показатели загрязненности сточных вод	Концентрации загрязнений сточных вод предприятий, мг/дм ³ , относящихся к группам			
	1	2	3	4
Взвешенные вещества	1670-1820	190-1740	200-750	880-6230
ХПК	2660-3430	1140-4000	940-1800	2470-6690
БПК _{полн}	1790-2570	730-2200	73-105□	1510-4680
Жиры	400-500	90-60□	180-210	170-1340
Аммонийный азот	130-180	30-75	35-90	30-80
Фосфаты (PO ₄ ³⁻)	90-290	15-65	5-160	110-175
pH	6,5-6,9	6,1-7,9	6,6-7,0	6,7-7,0

упростить процесс удаления шламов и осадков путем устройства конического дна и относительно малой площади круглых в плане отстойников-флотаторов. При расчете флотационных камер учитывались дисперсные составы частиц загрязнений и пузырьков воздуха, играющие определяющую роль при осуществлении процесса флотации.

В результате исследований было установлено, что для обеспечения минимальных остаточных концентраций в очищенных сточных

водах взвешенных веществ и жиров нагрузки на поверхность зоны флотации по сухому веществу не должны превышать 2,2-2,6 кг/(м²·час) [12]. Давление и продолжительность насыщения рабочей жидкости должны определяться на основе экспериментально полученной зависимости между удельным расходом воздуха q_e (дм³/кг) и начальной концентрацией в сточных водах взвешенных веществ $C_n^{вв}$ (г/дм³):

$$q_e = 30,57 C_n^{вв-0,992}, \text{ дм}^3 / \text{кг}.$$

При предварительной очистке в отстойниках-флотаторах сточных вод мясокомбинатов эффективность извлечения взвешенных веществ и жиров составляет соответственно 35,5-85,8 и 65,6-87,8 %, а при очистке сточных вод убойных цехов птицефабрик - 76,8-95,7 и 76,8-93,0 %. Средние остаточные концентрации взвешенных веществ и жиров при этом не превышают соответственно 246 и 74 мг/дм³. Одновременно флотационная очистка обеспечивает снижение ХПК сточных вод на 39,5-76,0 % (в среднем на 57,8 %), БПК₃ - на 43,7-63,8 % (52,8 %), БПК_{полн} - на 41,8-74,2 % (53,3 %). Получены эмпирические зависимости, позволяющие определять концентрации загрязнений в очищенных сточных водах по их значениям в исходных стоках.

При создании нового типа биохимического реактора для очистки высококонцентрированных сточных вод с повышенным содержанием аммонийного азота за основу брались главные средства интенсификации процессов биохимического окисления органических загрязнений, а именно увеличение массы активного ила, принимающего участие в процессе очистки, обеспечения оптимального кислородного и гидродинамического режимов в реакторе, создание аноксидных зон [3]. Исходя из этого были разработаны аэротенки-отстойники гидравлической



Рис. 1. Отстойник-флотатор диаметром 7,2 м
Fig.1. Settler-flotator diametr 7,2 m

высотой 6-10 м с поверхностной струйной аэрацией (рисунок 2), имеющие следующие преимущества: 1) в одном сооружении осуществляется биологическая очистка сточных вод при повышенных дозах активного ила и эффективное гравитационное разделение высококонцентрированной иловой смеси; 2) применение системы струйной аэрации обеспечивает высокую окислительную способность и эффективность аэрации при полном исключении возможности за жиривания и засорения аэраторов; 3) за счет постоянного отбора иловой смеси с нижней придонной части и ее подачи на поверхностные струйные аэраторы, обеспечивается рециркуляция активного ила и нисходящее движение иловой смеси в зоне аэрации; 4) поверхностная струйная аэрация обеспечивает аэробные условия в верхней части зоны аэрации, а в нижней ее части, в результате постепенного уменьшения концентраций растворенного кислорода за счет биохимических процессов, - возникают анаэробные условия, что обеспечивает осуществление процессов нитрификации-денитрификации; 5) биологическое окисление органических веществ, нитрификация и денитрификация осуществляются единым активным илом при использовании в качестве источника органического углерода для денитрификации собственно очищаемых сточных вод.

Эффективная предварительная очистка сточных вод в отстойниках-флотаторах позволяет осуществить полную биологическую очистку сточных вод в аэротенках-отстойниках. Установлено, что предельная нагрузка на активный

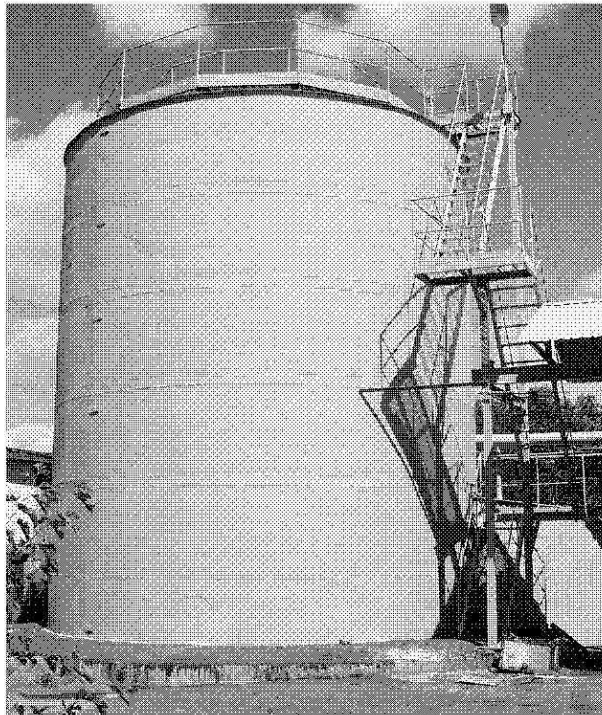


Рис. 2. Аэротенк-отстойник
Fig.2. Aeration tank-settler

ил по БПК_{полн} при которой достигаются показатели полной биологической очистки сточных вод, составляет 260 мг/(г.сутки). При нагрузках на активный ил по БПК_{полн} меньше 500 мг/(г.сутки), эффективность биологической очистки составляет 92-99 %, а при больших нагрузках - уменьшается до 80-98 % (рисунок 3) [4].

Зависимость илового индекса от нагрузки на активный ил по БПК_{полн} (рисунок 4) имеет четкий характер и напоминает известную аналогичную зависимость для городских сточных вод, однако при этом не наблюдается «вспухание» активного ила в диапазоне нагрузок 500-1300 мг/(г.сутки) [8]. При увеличении нагрузки по БПК_{полн} выше 400 и уменьшении ниже 150 мг/(г.сутки) иловый индекс растет, не превышая при этом значение 131 см³/г, что свидетельствует о его удовлетворительных седиментационных свойствах. Увеличение концентрации активного ила в зоне аэрации при этом не приводит к значительному увеличению его выноса из вторичных отстойников. Так, например, увеличение концентрации активного ила в зоне аэрации аэротенков-отстойников Неженского мясокомбината до 7,1 г/дм³ обеспечивало рост окислительной мощности по БПК_{полн} до 6850 г/

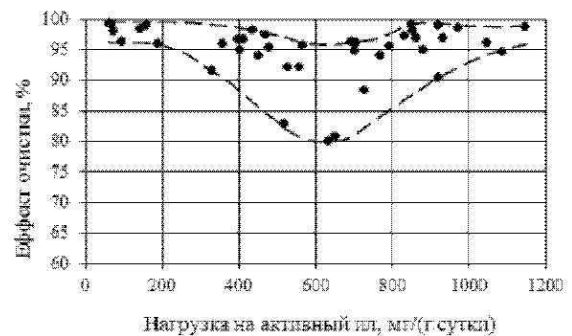


Рис. 3. Зависимость эффективности биологической очистки от нагрузки на ил
Fig. 3. Effect of sludge loading on BOD removal efficiency

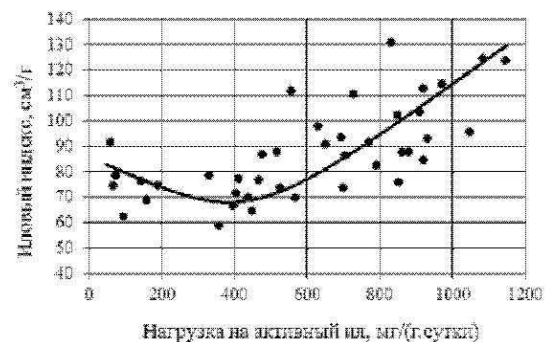


Рис. 4. Зависимость илового индекса от нагрузки на ил
Fig.4. Effect of sludge loading on sludge volume index

(м³.сутки), однако вынос активного ила из вторичных отстойников не превышал 229 мг/дм³, что соответствовало требованиям к сбросу очищенных сточных вод в городскую канализацию.

Выполненные расчеты материальных балансов соединений азота подтвердили осуществление симультанной нитрификации-денитрификации в аэротенках-отстойниках повышенной гидравлической высоты [6]. Было установлено, что в исследуемых аэротенках-отстойниках путем биологической нитрификации-денитрификации удаляется 22,0-71,0 % от исходного содержания азота аммонийных солей при общем уменьшении его концентрации на 92,4 - 98,1 %. При этом средние остаточные концентрации аммонийного азота в биологически очищенных сточных водах предприятий находились в пределах 1-14,2 мг/дм³. В пересчете на 1 м³ объема, удаление азота аммонийных солей за счет нитрификации-денитрификации увеличивалось с возрастанием нагрузки на активный ил от 5,1 г/(м³.сутки) для низконагружаемых аэротенков-отстойников мясоперерабатывающего комплекса «Росана», до 90,8 г/(м³.сутки) - для высоконагружаемых аэротенков Неженского мясокомбината. Полученные значения средних скоростей нитрификации (0,16-3,94 мг NH₄-N/(г.час)) и денитрификации (0,65-3,28 мг NO₃-N/(г.час)) являются сопоставимыми с соответствующими скоростями, достигаемыми при применении в аэротенках переменной аэрации или устройстве в них отдельных аноксидных и аэробных зон.

Для математического моделирования процесса биологической очистки сточных вод в производственных условиях использовали модель Еккенфельдера, которая достаточно точно описывает экспериментальные данные:

$$\frac{L_{en} - L_{ex}}{a_s \cdot t_{atm}} = KL_{ex},$$

где L_{en} - концентрации загрязнений в сточных водах, поступающих на биологическую очистку, мг O₂/дм³; L_{ex} - концентрации загрязнений в биологически очищенных сточных водах, мг O₂/дм³; a_s - концентрация беззольного вещества активного ила, г/дм³; t_{atm} - продолжительность аэрации сточных вод в аэротенке, час; K - константа Еккенфельдера, дм³/(г.час).

Графическая интерпретация полученных результатов показала, что значения константы K увеличиваются при эффективности биологической очистки более 60-70 % и могут быть определены по формуле [17]

$$K = a(1 - \eta)^b = a \left(\frac{L_{ex}}{L_{en}} \right)^b,$$

где η - эффективность биологической очистки, доли единицы; a и b - эмпирические коэффициенты (таблица 2).

Таблица 2. Значения коэффициентов a и b для различных групп мясоперерабатывающих предприятий в единицах БПК_{полн}, БПК₅ и ХПК

Table 1. a and b value in BOD, DOD₅ and COD units for different groups of meat-processing plants

Группа предприятий	Значения коэффициентов	
	a	b
Концентрации загрязнений сточных вод определены в единицах БПК _{полн}		
1	0,0378	-0,935
2	0,0134	-1,309
3	0,0221	-0,783
Концентрации загрязнений сточных вод определены в единицах БПК ₅		
1	0,286	-0,95
2	0,040	-0,969
3	0,0155	-0,889
Концентрации загрязнений сточных вод определены в единицах ХПК		
1	0,286	-0,951
2	0,0123	-1,481
3	0,025	-1,499

Доочистка биологически очищенных сточных вод на фильтрах с плавающей пенополистирольной загрузкой со скоростью фильтрации 4,1-7,0 м/час обеспечивает уменьшение ХПК сточных вод на 33 %, БПК_{полн} - на 44 %, концентраций взвешенных веществ - на 77 %, аммонийного азота - на 10 %, нитритного и нитратного азота - на 33 и 18 %. Предварительная, перед доочисткой, обработка сточных вод сульфатом алюминия увеличивает эффективность доочистки по ХПК - до 45 %, БПК_{полн} - до 58 %, а при начальной концентрации фосфатов не более 28 мг/дм³ позволяет полностью удалить их из сточных вод.

Количество осадка, образующегося в отстойниках-флотаторах, составляет 1-4 % расхода очищаемых сточных вод. Влажность осадка составляет 91,4-97,3 %, зольность - 20,2-35,5 %, удельное сопротивление фильтрации - 98-784.10¹⁰ см/г. Среднее суточное количество образующегося флотошлама составляет 1,7-2,5 % расхода очищаемых сточных вод для мясокомбинатов и 0,8-1 % - для птицефабрик. Влажность флотошлама находится в пределах 83,9-94,1 %, а зольность составляет 11,7-16,7 %. Содержание жировых веществ в флотошламе составляет 21,6-29,4 % массы сухого вещества, указывает на целесообразность его утилизации в цехах технических фабрик для получения мясокостной муки и технического жира [13].

Во время исследований процесса механического обезвоживания осадка на центрифугах ОГШ-501У-01, выполняемых на Черниговском мясокомбинате, установлено, что основные технологические параметры следует принимать следующими: скорость вращения ротора - 3000 об/мин., радиус слива фугата - 200 мм;

часовая производительность центрифуги - 7-10 м³/час. При этом влажность кека составляет в среднем 80%.

Производственные исследования технологии очистки сточных вод подтвердили возможность достижения показателей качества очистки сточных вод МПП, отвечающие требованиям к их сбросу в городские канализации или в природные водоемы

(табл. 3, 4).

При расходах очищаемых сточных вод до 500 м³/сутки для сокращения длины коммуникаций между сооружениями, использования тепла сточных вод для поддержания оптимального температурного режима, а также обеспечения компактности целесообразно пространственно-функциональное комбинирование сооружений между собой.

Таблица 3. Результаты очистки сточных вод мясокombината (сброс в городскую канализацию)

Table 3. Results of meat processing plant wastewater treatment (discharge to municipal sewers)

Показатели загрязненности сточных вод	Значения показателей загрязненности сточных вод			Общий эффект очистки, %
	неочищенных	после очистки		
		в отстойнике-флотаторе	в аэротенках	
pH	6,80	6,81	7,37	-
Взвешенные вещества, мг/дм ³	<u>119-12067</u> 1793	<u>122-590</u> 326	<u>5,2-44</u> 23	98,7
ХПК, мг O ₂ /дм ³	<u>551-14719</u> 3430	<u>637-2828</u> 1463	<u>85-445</u> 248	92,8
БПК _{полн} , мг O ₂ /дм ³	<u>266-2759</u> 1788	<u>406-1795</u> 1040	<u>10-104</u> 39,8	97,8
Жиры, мг/дм ³	<u>78-3147</u> 483	<u>50-108</u> 67	<u>5,3-34,3</u> 18,4	96,2
Азот аммонийный, мг/дм ³	<u>54-302</u> 178	<u>72-310</u> 188	<u>0-30,3</u> 14,2	92,0
Нитриты (N), мг/дм ³	0-0,21	0-0,15	0-3,89	-
Нитраты (N), мг/дм ³	отс.	отс.	0-39,5	-
Фосфаты (PO ₄ ³⁻), мг/дм ³	<u>45-220</u> 128	<u>36-203</u> 118,8	<u>0-18</u> 3,75	97,1

Таблица 3. Результаты очистки сточных вод мясоперерабатывающего комплекса «Росана»

Table 3. Results of small meat processor wastewater treatment (discharge to river)

Показники забруднення стічних вод	Значения показателей загрязненности сточных вод				Общий эффект очистки, %
	неочищенных	после очистки		после доочистки	
		в отстойнике-флотаторе	в аэротенках		
pH	6,8	6,6	7,1	7,4	-
Взвешенные вещества, мг/дм ³	<u>205-731</u> 361	<u>135-406</u> 233	<u>2,5-24,9</u> 8,7	<u>0,4-4,0</u> 2,0	99,4
ХПК, мг O ₂ /дм ³	<u>941-1802</u> 1303	<u>431-1121</u> 788	<u>81-90</u> 83,2	<u>38,8-84</u> 55,6	95,7
БПК _{полн} , мг O ₂ /дм ³	<u>731-1061</u> 885	<u>397-831</u> 523	<u>8,2-24,0</u> 14,6	<u>4,2-12,5</u> 8,1	99,2
Жиры, мг/дм ³	<u>178-210</u> 194	<u>62,6-71,4</u> 66,7	следы	отс.	100
Азот аммонийный, мг/дм ³	<u>34,3-90,2</u> 58,4	<u>31,7-64</u> 41,4	<u>0,9-1,3</u> 1,0	<u>0,3-1,2</u> 0,9	98,5
Нитриты (N), мг/дм ³	отс.	отс.	0,03-0,2	0,03-0,1	-
Нитраты (N), мг/дм ³	0-0,79	0-0,76	13,3-27	11,2-25	-
Фосфаты (PO ₄ ³⁻), мг/дм ³	<u>23-59</u> 35	<u>15-45</u> 30,4	<u>2,0-6,3</u> 3,1	<u>1,3-5,5</u> 2,9	91,7

Разработаны конструкции компактных сооружений для очистки сточных вод МПП, в которых отстойник-флотатор сочетается с аэротенком-отстойником первой степени, а аэротенк-отстойник второй степени - с фильтром с загрузкой из вспененного полистирола (рисунок 5) [7]. Самотечное поступление доочищаемых сточных вод в виде аэрируемых струй на фильтры с загрузкой из вспененного полистирола обеспечивает улучшение кислородных условий в толще фильтрующей загрузки (рисунок 6). Промывная вода фильтров сбрасывается в «голову» очистных сооружений.

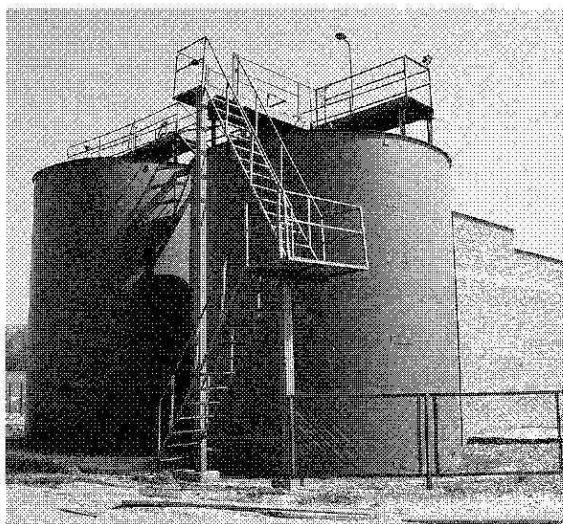


Рис. 5. Очистные сооружения небольшого мясоперерабатывающего предприятия
Fig. 5. Wastewater treatment plants for small meat processor

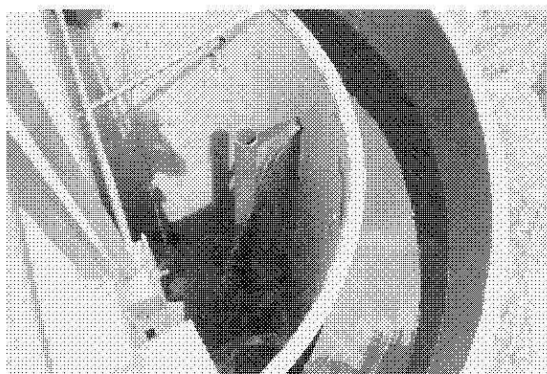


Рис. 6. Поступление сточных вод на фильтр доочистки
Fig. 5. Receipt of wastewater into polishing filter

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально подтверждено определяющее влияние технологических процессов переработки мяса на состав и свойства образуемых сточных вод. В связи с этим предприятия МПП

могут быть разделены на четыре группы с отличающимися уровнями загрязнения сточных вод.

2. В производственных условиях исследована эффективность работы отстойников-флотаторов вертикального типа. Получены зависимости между начальной концентрацией взвешенных веществ и удельным расходом воздуха при флотации, нагрузкой на поверхность зоны флотации по сухому веществу и остаточными концентрациями взвешенных веществ и жиров, между начальными и конечными концентрациями загрязнений.

3. Исследована работа комбинированных аэротенков-отстойников гидравлической высотой 6-10 м с поверхностной струйной аэрацией. Их использование позволяет увеличить дозу ила и тем самым повысить окислительную мощность, а также обеспечивает эффективное удаление аммонийного азота путем симультанной нитрификации-денитрификации.

4. Исследован характер влияния нагрузки на активный ил на эффективность биологической очистки и значение илового индекса, установлена предельная нагрузка на активный ил, при которой достигаются показатели полной биологической очистки. Установлена зависимость константы скорости биохимического окисления загрязнений от эффективности очистки, получены аналитические формулы для ее определения.

5. Установлено, что фильтрование биологически очищенных сточных вод через плавающую пенополистирольную загрузку позволяет обеспечить необходимую степень глубокой доочистки сточных вод. В результате выполнения производственных исследований установлено, что осадки, образующиеся при очистке сточных вод мясоперерабатывающих предприятий, могут эффективно обезвоживаться на центрифугах типа ОГП.

6. На основе предложенной концепции пространственно-функционального комбинирования сооружений для флотационной, двухступенчатой биологической очистки и доочистки сточных вод разработаны компактные металлические очистные сооружения заводского изготовления, что позволило до минимума сократить длину коммуникаций между отдельными сооружениями и занимаемую ими площадь, а также значительно сократить сроки строительства очистных сооружений.

7. Производственные испытания разработанной технологии подтвердили возможность очистки сточных вод МПП до норм сброса в городские канализации и в естественные водоемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биологическая очистка производственных сточных вод: Процессы, аппараты и сооружения / [Яковлев С.В., Скирдов И.В., Швецов В.Н. и др.]; под ред. С.В. Яковлева. – М. : Стройиздат, 1985. – 208.

2. Виробництво найважливіших видів промислової продукції по місяцях за 2003-2009 роки / Держ. ком. статистики України (дата останньої модифікації 12.07.2010 р.). – Режим доступу : www.ukrstat.gov.ua//operativ/operativ2006/pr/prm_ric/prm_ric_u/vov2005_u.html – Назва з екрана.
3. Ковальчук В.А. 2010 Біологічна очистка стічних вод в аеротенках-відстійниках зі струминною аерацією / В.А. Ковальчук, О.В. Ковальчук // Ринок інсталяцій. – № 5. – 11-13.
4. Ковальчук В.А. 2008 Біологічна очистка стічних вод м'ясопереробних підприємств / В.А. Ковальчук // Гідромеліорація і гідротехнічне будівництво: Збірник наукових праць. – Випуск 33. – Рівне. – 143-149.
5. Ковальчук В.А. 2009 Відстійник-флотатор для попередньої очистки стічних вод м'ясопереробних підприємств / В.А. Ковальчук // Ринок інсталяцій. – № 9. – 20-21.
6. Ковальчук В.А. 2009 Дослідженні процесів нітрифікації-денітрифікації в аеротенках-відстійниках підвищеної гідралічної висоти / В.А. Ковальчук // Гідромеліорація і гідротехнічне будівництво: Збірник наукових праць. – Випуск 34. – Рівне. – 199-206.
7. Ковальчук В.А. Компактные сооружения для глубокой очистки сточных вод мясоперерабатывающих предприятий / В.А. Ковальчук // Сотрудничество для решения проблемы отходов: Матер. VI Междунар. конф. (8-9 апреля 2009 г., г. Харьков, Украина). – 203-205.
8. Ковальчук В.А. 2002 Очистка стічних вод: Навчальний посібник для студентів вузів / В.А. Ковальчук. – Рівне: Рівненська друкарня. – 622.
9. Ковальчук В.А. 2011 Розвиток наукових і практичних засад інтенсифікації роботи споруд для флотаційної та біологічної очистки стічних вод м'ясопереробних підприємств: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.23.04 / В.А. Ковальчук. – Рівне. – 36.
10. Ковальчук В.А. 2004 Споруди для очищення стічних вод м'ясопереробних підприємств / В.А. Ковальчук // Ринок інсталяцій. – № 1. – 17-18.
11. Ковальчук В.А. 1999 Технологія очистки стічних вод м'ясокомбінатів / В.А. Ковальчук // Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво : Зб. наук. праць. – Спецвипуск. – Рівне. – 262-266.
12. Ковальчук В.А. 2000 Дослідження ефективності флотаційної очистки стічних вод Чернігівського м'ясокомбінату «Ритм» / В.А. Ковальчук // Вісник РДТУ: Зб. наук. праць. – Вып. 2. – Рівне – 112-116.
13. Нездойминов В. Новая экологически безопасная технология утилизации осадков / В. Нездойминов, В. Чернышев // MOTROL. – Commission of motorization and energetics in agriculture : Polish Academy of sciences. — Lublin. – Vol. 13C. – 17-23.
14. Никитин Г.А. 1981 Биохимические основы микробиологических производств: Учеб. Пособие / Г.А. Никитин. – К. : Вища школа. – 312.
15. Очистка сточных вод предприятий мясной и молочной промышленности / С.М.Шифрин, Г.В.Иванов, Б.Г.Мишуков, Ю.А.Феофанов. – М.: Лег. и пищ. промышленность, 1981. – 272.
16. Bohdziewicz J. 2002 Application of the system which combines coagulation, activated sludge and reverse osmosis to the treatment of the wastewater produced by the meat industry / J. Bohdziewicz, E. Sroka, E. Lobos // Desalination. – Vol. 144. – 393-398.
17. Buraczewski J. 1981 Studia nad modelem matematycznym procesu oczyszczania sciekow za pomoca osadu czynnego i analiza jego stosowalnosci / J. Buraczewski // Prace naukowe politechniki Warszawskiej: Budownictwo. – Z 74. – Warszawa, - 115.
18. Cammarota M. 2006 A review on hydrolytic enzymes in a treatment of wastewater with high oil and grease content / M. Cammarota, D. Freire // Bioresource Technology. – Vol. 97. – 2195-2210.
19. Masse L. 2001 The effect of an enzymatic pretreatment on the hydrolysis and size reduction of fat particles in slaughterhouse wastewater / L. Masse, K.J. Kennedy, S.P. Chou // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. – №76. – 629-635.
20. Masse, D.I. 2000 Characterization of wastewater from hog slaughterhouses in Eastern Canada and evaluation of their in-plant wastewater treatment systems / D.I. Masse, L. Masse // Canadian Agricultural Engineering. – Vol. 42, No. 3 July/August/September. – 139-146.
21. Nunez L.A. 2001 Evaluation of an anaerobic/aerobic system for carbon and nitrogen removal in slaughterhouse wastewater / L.A. Nunez, B. Martinez // Water Science & Technology. – Vol. 44, No 4. – 271-277.

WASTEWATER TREATMENT TECHNOLOGIES OF MEAT PROCESSING PLANTS

Summary. The results of experimental research of physical and chemical technologies and biological treatment of wastewater meat processing plants.

Key words: meat processing plants, wastewater, settler-flotator, aeration tank-settler, technology of wastewater treatment.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПРЯМОТОЧНОГО ПАРОВОГО КОТЛА ПРИ ПОДПИТКЕ ВОДОЙ, ПРОШЕДШЕЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКУЮ ВОДОПОДГОТОВКУ.

Александр Лукьянов, Аубекир Найманов, Светлана Антоненко

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры.
Адрес: Украина, Донецкая область, г.Макеевка, 86123, ул. Державина, 2.
E-mail: sv_antonenko@mail.ru

Аннотация. В статье приведены результаты исследований процесса накипеобразования в паровом котле при подпитке электрохимически обработанной водой. Представлены зависимости интенсивности накипеобразования от глубины умягчения подпиточной воды, интенсивность накипеобразования на нагревательном элементе котла. Приведены результаты проверки стабильности обнаруженного эффекта противонакипного действия электролиза подпиточной воды на отложения на поверхности нагрева парового котла при длительной его эксплуатации.

Ключевые слова: электрохимическое умягчение, удельный расход электричества, интенсивность накипеобразования.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ.

Дефицит топливно-энергетических ресурсов в Украине побуждает заниматься экономией указанных ресурсов, кроме того, напряженность экологической обстановки в Донбассе требует снижения вредных выбросов в окружающую среду [5,10,24,25]. Вопросами использования энергосберегающих технологий для водоочистки и умягчения воды, а также экологическими проблемами водоочистки активно занимается ряд авторов [4,6,8,9,13,23,28,29,30]. Значительный интерес в обоих этих направлениях представляет применение противонакипной электрообработки воды постоянным током для водоподготовки паровых и жарогазотрубных водогрейных котлов.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ.

В аппаратах электрохимической водоподготовки, чаще всего, используют электрический ток постоянной полярности, причем сила тока остается также постоянной. При этом в воде протекают процессы электролиза и, отчасти, электролиза [3,7, 27]. Электроды используются нерастворимые.

Один из первых видов установок для электрохимического умягчения разработан Фархадовым А.А. [26]. В резервуаре системы водного охлаждения мощных электронных ламп была размещена система стальных катодов и графитовых анодов, на которые подавался постоянный ток от выпрямителя. Установка отличалась достаточной эффективностью, но и громоздкостью и небольшим сроком службы, по принципу действия представляла собой бездиафрагменный электролизер.

Дальнейшее развитие бездиафрагменные аппараты получили в работах [16,18,19,20,21]. В них

предполагается, что осаждения накипи из пересыщенной за счет нагрева и упаривания накипеобразователями воды происходит преимущественно за счет термо-э.д.с. Последняя возникает за счет градиента температур между горячей стенкой теплообменника и омывающей ее водой, стенка приобретает отрицательный заряд величиной до – 100 мВ. Перед теплообменниками расположена камера с электродами, на которые подается разность потенциалов, значительно превышающая термо-э.д.с. Накипеобразователи, в частности – карбонат кальция, осаждаясь на поверхности катода, в теплообменник не попадали. Эффект снижения накипеобразования был близок к 100%. В работе также приводятся данные статистической обработки результатов экспериментов с противонакипными аппаратами. Получено уравнение, которое позволяет найти величину удельного расхода электроэнергии (дозу электричества), необходимую для подавления накипеобразования:

$$\partial_s = 360\sqrt{[x]}, \text{ А-ч/м}^3, \quad (1)$$

здесь ∂_s – удельный расход электричества, А-ч/м³,

$[x]$ – мгновенный избыток карбоната кальция, моль/л.

Аппараты прошли промышленную апробацию в системах оборотного водоснабжения химических предприятий и показали высокую эффективность. Испытания в водогрейных котельных подтвердили практически полное подавление накипеобразования в котлах.

Довольно значительный опыт, накопленный при использовании метода электрохимического умягчения подпиточной воды для водогрейных котельных позволяет считать перспективным его применение и в водоподготовке для паровых котлов [14,15,16,18,19,20,21]. Установлено, что в

водогрейных котельных применение противонакипной электрообработки позволяет отказаться от натрийкатионитного умягчения подпиточной воды, что резко снижает сброс засоленных стоков в водоемы. Кроме того, себестоимость противонакипной электрообработки на порядок ниже натрийкатионирования, эффективность же снижения образования накипи близкая к 100%.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ.

Отработать технологический режим работы паровых котлов при подпитке электрохимически умягченной водой, определить зависимости интенсивности образования накипи от глубины умягчения подпиточной воды, интенсивности накипеобразования во времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Использование натрийкатионитного умягчения при подпитке прямоточных паровых и жарогазотрубных водогрейных котлов, решая проблему умягчения воды, создает экологическую проблему из-за сброса засоленных стоков от водоподготовительных установок в водоемы. Такие стоки содержат до 40-50 г/л хлоридов кальция, магния и натрия; усугубляют и без того сложную экологическую обстановку в Донбассе. Эти вопросы регулируются правительством в документах [5,10,24,25]. Использование электрохимического умягчения воды позволяет решать не только экологические проблемы, но и дает возможность экономить энергетические ресурсы, поскольку себестоимость электрохимического умягчения на порядок ниже натрийкатионирования.

Использование противонакипной электрообработки воды постоянным током в водоподготовке водогрейных котельных дает положительные результаты [14,15,16,18,19,20,21,26], а приведенные результаты экспериментальных исследований накипеобразования в паровом котле при подпитке электрохимически умягченной водой [1,2,17,22] позволяют считать перспективным применение данного метода и в водоподготовке паровых котлов.

Для выявления возможности эксплуатации парового котла при подпитке электрохимически умягченной водой определялась интенсивность накипеобразования на теплоотдающей поверхности при эксплуатации котла. Исходная вода имела

жесткость 6-7 мг-экв/л, щелочность 4-5 мг-экв/л, солесодержание 800-900 мг/л.

Первый этап опытов продолжительностью 8 часов имел целью отработку методики проведения экспериментов, оценку возможных границ измерения параметров интенсивности накипеобразования и показателей качества воды. Первая серия опытов – контрольная, проводилась при подпитке парового котла сырой (неумягченной) водой из водопровода. Во второй серии опытов на подпитку парового котла подавалась вода, прошедшая электрохимическое умягчение в катодной зоне диафрагменного электролизера при удельном расходе электричества 50 А·ч/м³. В третьей серии опытов на подпитку парового котла подавалась вода, прошедшая электрохимическое умягчение при удельном расходе электричества 100 А·ч/м³, а в четвертой серии экспериментов на подпитку котла подавалась вода, прошедшая электрохимическое умягчение в катодной зоне диафрагменного электролизера при удельном расходе электричества 150 А·ч/м³.

Были получены следующие данные по изменению процента накипи на поверхности нагревательного элемента $g_{отн}$, %, от общего количества образующейся накипи и средней интенсивности накипеобразования $g_{ср}$, г/м²·час, при увеличении удельного расхода электричества: (d_3 , А·ч/м³).

d_3 , А·ч/м ³	0	50	100	150.
Средняя интенсивность накипеобразования $g_{ср}$: г/м ² ·час	1,7	1,02	0,73	0,38
$g_{отн}$, %	15,5	8,9	11,3	18,7.

Явно наблюдается минимум при неглубокой степени умягчения воды ($d_3 = 50$ А·ч/м³). Отсюда следует, что электрохимическая активация эффективна в достаточно жесткой воде. При увеличении глубины умягчения эффективность электрохимической активации снижается.

График изменения интенсивности накипеобразования в зависимости от удельного расхода электричества приведен на рис. 1. Математическая обработка результатов исследований проведена стандартной программе Curve expert, график имеет высокую корреляционную связь.

Кривая на рис.1 коррелируется зависимостью:

$$g = 1.698 - 0,020 \cdot d_3 + 0.0002 \cdot d_3^2 - 6,08 \cdot 10^{-7} \cdot d_3^3 \quad (2)$$

где, g – интенсивность накипеобразования, г/м²ч,

d_3 – удельный расход электричества, А·ч/м³.

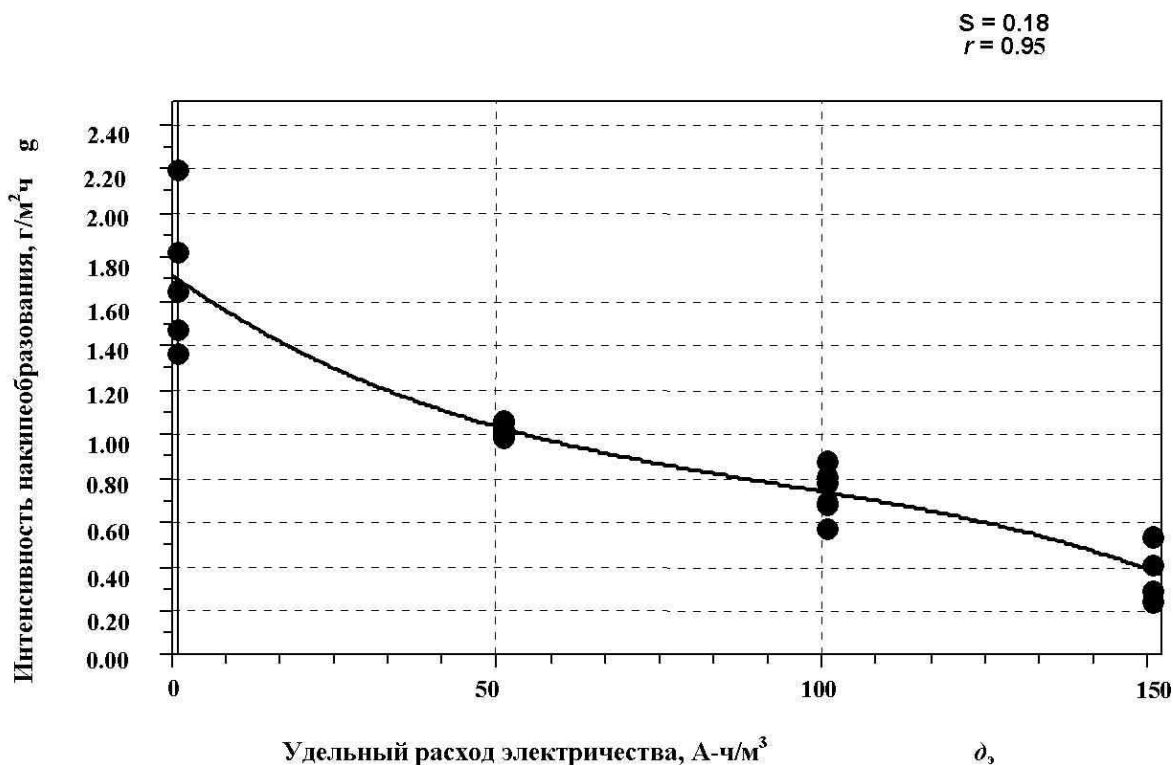


Рис. 1. Зависимость накипеобразования на поверхности нагрева котла от глубины умягчения воды при продолжительности работы котла 8 часов

Fig. 1. The dependence of the scaling on the heating surface of the boiler from the depth of softening water for the duration of the 8-hour operation of the boiler

Зависимость интенсивности накипеобразования на поверхности нагрева котла от удельного расхода электричества довольно близка к линейной. Результат, в общем то, ожидаемый. Чем выше удельный расход электричества, тем выше глубина умягчения воды и тем меньше в воде накипеобразователей – карбоната кальция и гидроксида магния.

На втором этапе исследований продолжительность работы парового котла увеличена до 72 часов. Сначала, как в первой серии экспериментов на подпитку котла подавалась сырая неумягченная вода макеевского водопровода из канала Сев.Донец-Донбасс. Во второй серии – на подпитку котла подавалась вода, прошедшая электрохимическое умягчение при удельном расходе электричества 50 А·ч/м³, в третьей – умягченная при 100 А·ч/м³ и в четвертой – при 150 А·ч/м³. Методика опытов оставалась той же, что и на первом этапе исследований. Продувка производилась путем сброса из котла 0,6-0,8 л воды через каждые 8 часов работы. Кратность упаривания воды составила около 8-9.

При продолжительности опыта 72 часа были получены следующие данные по изменению процента накипи на поверхности нагревательного элемента $\xi_{отн}$, %, от общего количества образующейся накипи и средней интенсивности

накипеобразования g_{cp} , г/м²·час, при увеличении удельного расхода электричества (∂_3 , А·ч/м³).

∂_3 , А·ч/м³	0	50	100	150
Средняя интенсивность накипеобразования g_{cp} , г/м²·час	0,93	0,84	0,26	0,181
$\xi_{отн}$, %	7,8	7,1	3,9	6,3

Проведенные исследования [1,2,12] позволили предположить, что эффект электрообработки воды заключается не только в простом снижении содержания солей жесткости. Электрообработка способствует выделению большей части накипи в объеме воды, а не на поверхности теплообмена. Вероятно, это связано с образованием большого количества центров кристаллизации накипи в объеме воды при ее электрообработке. Такое явление часто называют электрохимической активацией растворов. Снижение накипеобразования связывают с двумя эффектами электрообработки – электрохимическим умягчением и электрохимической активацией подпиточной воды.

Что касается механизма действия электрообработки подпиточной воды на накипеобразование на поверхности нагрева парового котла, то можно высказать следующее предположение: электролиз подпиточной воды приводит к нарушению стабильности углекислотно-карбонатной системы водопроводной воды.

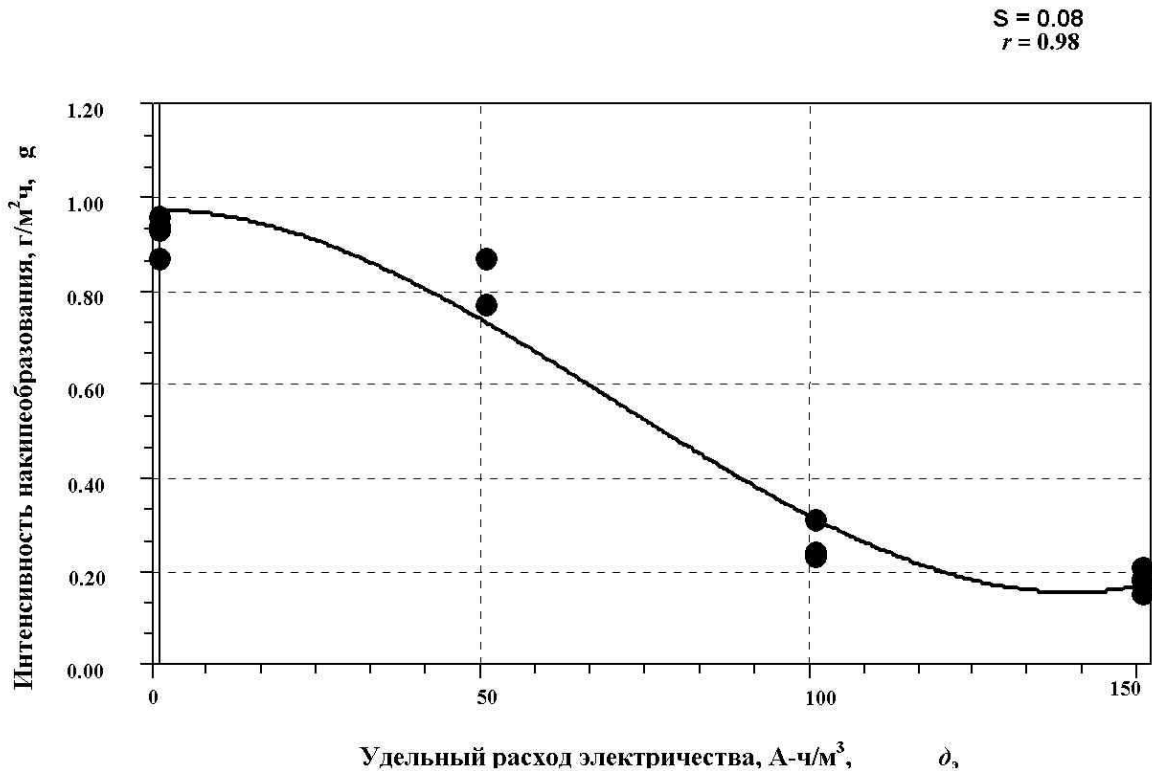


Рис. 2. Зависимость накипеобразования на поверхности нагрева котла от глубины умягчения подпиточной воды при продолжительности работы котла 72 часа

Fig. 2. The dependence of the scaling on the heating surface of the boiler from the depth of softening water for the duration of the 72-hour operation of the boiler

При этом образуются множество центров кристаллизации в виде мельчайших частиц карбоната кальция. При повышении удельного расхода электричества количество центров кристаллизации увеличивается. При удельном расходе электричества около 100 А·ч/м³ и более количество центров оказывается достаточным, чтобы обеспечить при нагреве воды в котле выпадение практически всей накипи в объеме воды в виде шлама. Кристаллизация карбоната кальция и гидроксида магния происходит на центрах кристаллизации, а не на поверхностях нагрева котла.

Кристаллизация и коагуляция являются родственными процессами и вид кривой на рис. 2 свидетельствует о коагуляционно-кристаллизационном механизме действия электролиза подпиточной воды на предотвращение накипеобразования в паровом котле.

Зависимость интенсивности накипеобразования от удельного расхода электричества (рис.2) описывается уравнением:

$$g = 0,973 - 0,00013 \cdot \delta_3^2 + 6,096 \cdot 10^{-7} \cdot \delta_3^3, \quad (3)$$

где, g – интенсивность накипеобразования, г/м²·ч,

δ_3 – удельный расход электричества, А·ч/м³.

В следующей серии экспериментов изучалась стабильность эффекта противонакипного действия электролиза подпиточной воды на отложения на поверхностях нагрева парового котла при длительной его эксплуатации. Исследования проводились на полупромышленной установке. Продолжительность эксплуатации задана равной 1000 часов. Через каждые 100 часов работы котел останавливался и нагревательный элемент взвешивался, затем котел снова включался в работу. Это позволило проследить динамику накопления накипи на поверхности нагрева. Продувка котла производилась через каждые 8 часов работы путем сброса 0,7-0,8 л воды из котла, т.е. составляла около 10 %. Кратность упаривания воды в котле составляла около 11. На подпитку котла подавалась вода прошедшая электрохимическое умягчение в катодной камере диафрагменного электролизера при удельном расходе электричества 150 А·ч/м³. Такой несколько завышенный расход электричества принят для обеспечения гарантированного противонакипного эффекта. Результаты исследований приведены в табл.1.

Можно отметить следующие положения: прогнозируемая толщина слоя накипи при непрерывной эксплуатации котла в течении 1 года

(8760 часов) составит $\Delta = 0,50$ мм. Эта величина не превышает допустимую толщину отложений 0,5 мм по п.8.1.3. [11]. График изменения удельного количества накипи во времени приведен на рис.3.

Таблица 1. Интенсивность накипеобразования при подпитке парового котла электрохимически умягченной водой при удельном расходе электричества $150 \text{ А}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$. Продолжительность опыта $\tau = 1000$ часов, кратность упаривания воды 11.

Table 1. The intensity of scaling in the steam boiler at feed electrochemically softened water in the specific consumption of electricity $150 \text{ A}\cdot\text{h}/\text{m}^3$. The duration of the experiment $\tau = 1000$ hours, the multiplicity of evaporation of water 11.

Продолжительность работы установки час	Масса накипи на поверхности нагрева, $G_{\text{н}}$, г.	Прирост массы накипи на интервале в 100 час, ΔG , г	Удельное количество накипи от начала опыта $g_{\text{уд}}$, $\text{г}/\text{м}^2$	Толщина слоя накипи, мм	Интенсивность накипеобразования на интервале 100 час, $g_{\text{н}}$, $\text{г}/\text{м}^2\cdot\text{час}$	Общая интенсивность накипеобразования от начала опыта, g , $\text{г}/\text{м}^2\cdot\text{час}$
0	0	-	-	-	-	-
100	0,3267	0,3267	23,6	0,01	0,236	0,236
200	0,6553	0,3286	47,4	0,02	0,238	0,237
300	1,0434	0,3881	75,5	0,031	0,281	0,28
400	1,0463	0,0029	75,7	0,031	0,0021	0,21
500	1,0369	-0,0094	75,0	0,031	-	0,16
600	1,5088	0,4719	109,0	0,045	0,342	0,2
700	1,7716	0,2628	128,0	0,053	0,190	0,2
800	2,0387	0,2671	148,0	0,061	0,193	0,2
900	2,2226	0,1839	160,0	0,067	0,133	0,2
1000	1,7724	-0,4502	128,0	0,053	-	0,14

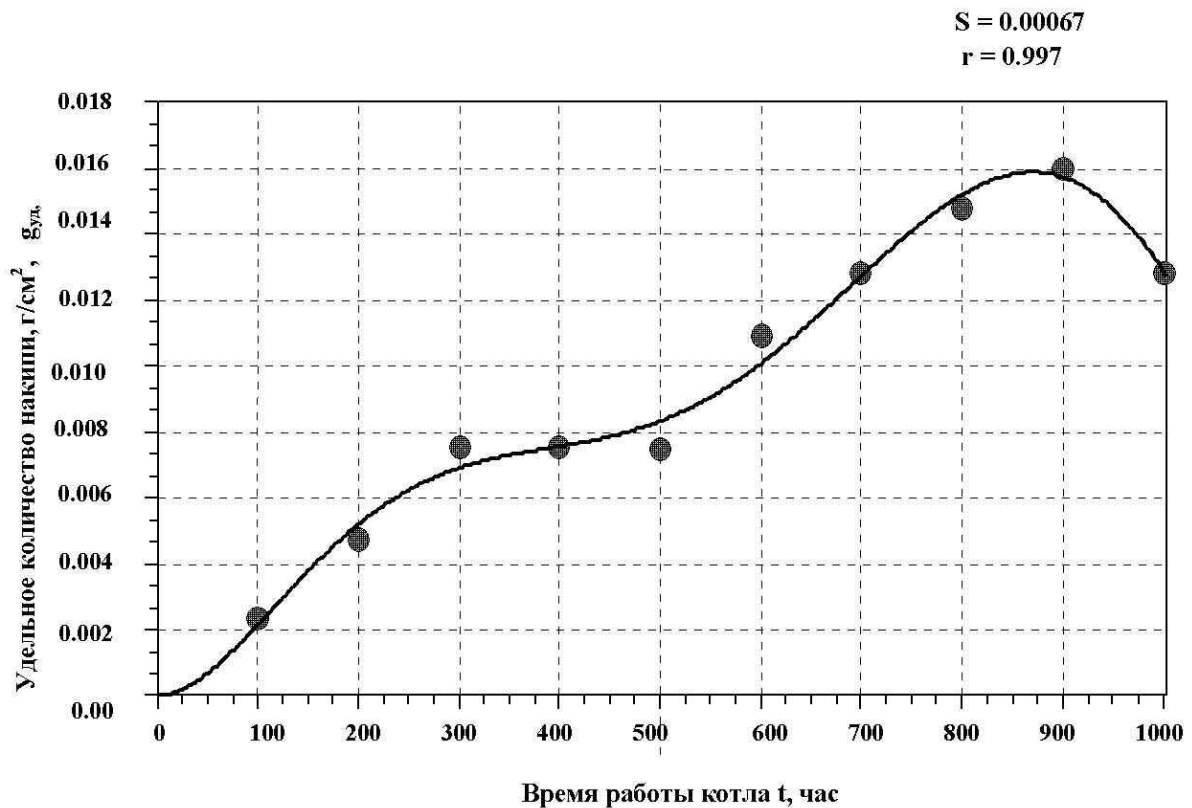


Рис. 3. Изменение удельного количества накипи на нагревательных элементах котла во времени
Fig. 3. Change the specific amount of scurf on the heating elements of the boiler in time

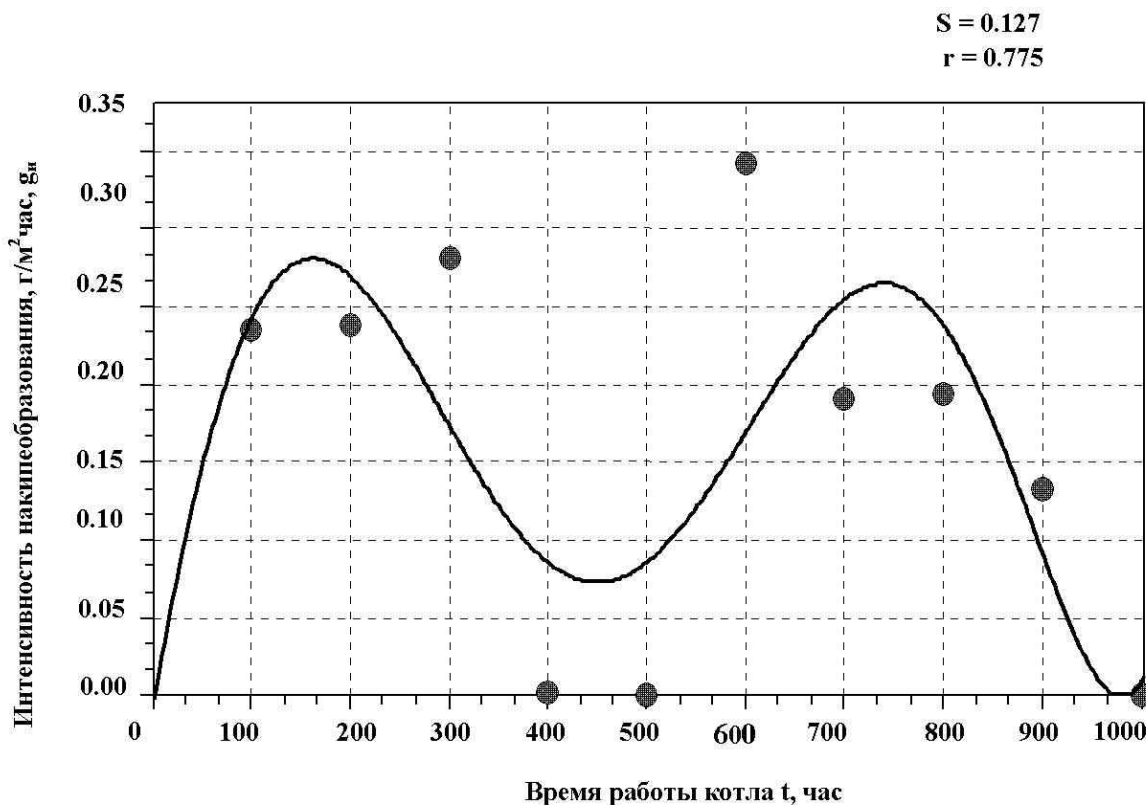


Рис. 4. Интенсивность накипобразования на нагревательном элементе котла.

Fig. 4. The intensity of scaling on the heating element of the boiler.

Графическая зависимость имеет вид полинома 6-й степени с высоким коэффициентом корреляции.

$$g_{уд} = 9,587 \cdot 10^{-6} - 1,113 \cdot 10^{-7} \cdot \partial_3 + 3,561 \cdot 10^{-7} \cdot \partial_3^2 - 1,641 \cdot 10^{-9} \cdot \partial_3^3 + 3,046 \cdot 10^{-12} \cdot \partial_3^4 - 2,469 \cdot 10^{-15} \cdot \partial_3^5 + 7,206 \cdot 10^{-19} \cdot \partial_3^6, \quad (4)$$

где, $g_{уд}$ – удельное количество накипи, г/см²,

∂_3 – удельный расход электричества, А·ч/м³.

Отметим, что периодически, примерно через каждые 500 часов эксплуатации котла, происходит отслаивание ранее образовавшейся накипи. Об этом свидетельствует отрицательный прирост массы накипи при продолжительности

работы установки 500 и 1000 часов. Во втором случае отслаивание происходит более интенсивно. Можно ожидать, что при длительной эксплуатации котла толщина слоя накипи стабилизируется и не будет далее расти, либо рост будет очень слабым. Это позволяет перевести паровые котлы небольшой мощности на подпитку электрохимически умягченной водой и отказаться от химводоочистки двухступенчатым натрийкатионированием.

Интенсивность накипобразования на нагревательном элементе котла приведена на рис.4, и имеет графическую зависимость полинома 6-й степени с высокой корреляционной связью.

$$g_{и} = -0,0039 + 0,0036 \cdot \partial_3 - 9,716 \cdot 10^{-6} \cdot \partial_3^2 - 2,805 \cdot 10^{-8} \cdot \partial_3^3 + 1,320 \cdot 10^{-10} \cdot \partial_3^4 - 1,600 \cdot 10^{-13} \cdot \partial_3^5 + 6,220 \cdot 10^{-17} \cdot \partial_3^6, \quad (5)$$

где, $g_{и}$ – интенсивность накипобразования, г/м² час,
 ∂_3 – удельный расход электричества, А·ч/м³.

Такое мероприятие, как электрохимическое умягчение подпиточной воды для паровых котлов может принести значительный экономический и экологический эффект. В водоемы не будут поступать весьма соленые стоки химводоочисток. Не будет необходимости в организации реагентного хозяйства.

ВЫВОДЫ.

Исходя из всего вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

- электрохимическая активация накипобразователей наиболее ярко проявляется при неглубокой степени умягчения подпиточной воды удельным расходом электричества 50 А·ч/м³. Об этом свидетельствует минимум процента накипи на поверхности нагрева от общего ее количества;

- зависимость интенсивности накипеобразования на поверхности нагрева котла от удельного расхода электричества на умягчение подпиточной воды имеет вид типичной коагуляционной кривой. Оптимальные удельные расходы электричества составляют около 100-150 А·ч/м³.

- снижение накипеобразования на поверхностях нагрева котла при подпитке электрохимически умягченной водой объясняется не только устранением части жесткости воды, но и коагуляционным действием образующихся при электрохимическом умягчении многочисленных центров кристаллизации частиц накипи в объеме воды.

- эксплуатация прямоточного парового котла при подпитке электрохимически умягченной водой в течение 1000 часов подтвердили возможность того, что в течении 1 года эксплуатации толщина слоя накипи на поверхности нагрева не превысит допустимую величину 0,5 мм.

- исследования показали, что паровые котлы могут работать без химводоочистки подпиточной воды двухступенчатым натрийкатионированием, если использовать электрохимическое умягчение подпиточной воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антоненко С.Е., 2005. Безреагентная технология водоподготовки для паровых котлов. – Вестник: Донбасская национальная академия строительства и архитектуры. – Макеевка. – Вып. 2005-2(50). – 28-33
2. Антоненко С.Е., 2003. Снижение накипеобразования в паровых котлах. – Вестник: Донбасская национальная академия строительства и архитектуры. – Макеевка. – Вып. 2003-4 (41). – 18-22.
3. Антропов Л.И., 1965. Теоретическая электрохимия: [учебник] – М.: Высш.шк. – 508.
4. Валкина Е., Вернези, Николенко И., Богуцкий П., 2010. Использование методов водоочистки в новейших энергосберегающих технологиях. MOTROL. — Commission of motorization and energetics in agriculture : Polish Academy of sciences. — Lublin, — Vol. 12С. — 114—120.
5. ВР Украины Закон от 21.12.2010 № 2818-VI (2units) Об Основных принципах (стратегии) государственной экологической политики Украины на период до 2020 года
6. Гончарук В.В., Маляренко В.В., 2001. Изменение свойств воды под влиянием электрохимической обработки. – Химия и технология воды. – т.23.№4 – 345.
7. Грановский М.Г., Лавров И.С., Смирнов О.В., 1976. Электрообработка жидкостей: [учебник] – Л.:Химия. – 216.
8. Демидова Ю.М., 2009. Ресурсосберегающая технология электрообработки воды для мини-ТЭЦ. Дисс. канд. тех. н. – Казань, – 203.
9. Дыганова Р.Я., Шинкевич Е.О., 2001. Экспериментальные исследования очистки воды в условиях г.Казани методом ЭХО. – Изв.вузов. Пробл.энерг., – № 11-12, – 123-127.
10. Закон Украины "О энергосбережении" от 01.07.94г. (с изменениями №783-XIV (783-14) от 30.06.99, ВВР, 1999, №34, ст.274 - редакция вступает в силу одновременно с вступлением в силу Закона о Государственном бюджете Украины на 2000 года)
11. Кострыкин Ю.М., Мещерский Н.А., Коровина О.В., 1990. Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления: [Справочник] – М.: Энергоатомиздат – 254.
12. Лукьянов А.В., Найманов А.Я., Антоненко С.Е., 2011. Экспериментальные исследования накипеобразования в паровом котле при подпитке электрохимически умягченной водой. – Вестник: Донбасская национальная академия строительства и архитектуры. – Макіївка. – Вып. 2011-5 (91). – 23-30.
13. Мазо А.А., Гребенюк В.Д., 1993. Экологические проблемы очистки воды. – Химия и технология воды. – №11,12. – 745-766.
14. Найманова А.А., 1998. Промышленные испытания противонакипной электрообработки воды в системах отопления. – Вестник: Донбасской государственной академии строительства и архитектуры. –Макеевка –Вып. 98-2 (10) – 57-59.
15. Найманов А.Я., Антоненко С.Е., 2004. Подпитка газовых котлов электрохимически умягченной водой. Технічні науки (будівництво). Зб.наукових праць ЛНАУ, – Луганск – №32(44) – 63-68
16. Найманов А.Я., Балинченко О.И., Лыштван В.Д., 1995. Влияние электрообработки воды импульсным током на отложение накипи. – Химия и технология воды. – т.17, №2. – 219-224.
17. Найманов А.Я., Зотов Н.И., Антоненко С.Е., 2004. Электрохимическая технология водоподготовки для паровых котлов. – «Коммунальное хозяйство городов» серия «Технические науки и архитектура». – Киев: Техніка. – вып.58.– 89-94.
18. Найманов А.Я., Кравченко М.В., 1991. Влияние электрообработки на накипеобразование в теплообменниках. – Новые технологические процессы и оборудование в области очистки воды и трубопроводов.: Сб.научн.тр. Отв.ред. Куликов Н.И. - Киев: УМК ВО.- 28-38.
19. Найманов А.Я., Кравченко М.В., Плеханов Т.Б., 1989. Снижение накипеобразования в водогрейных теплогенераторах посредством электрообработки воды. – Новые технологические решения для строительной пром-ти Донбасса: Тр. – Киев: УМК ВО. – 140.
20. Найманов А.Я., Найманова А.А., 1998. О механизмах действия электрообработки воды на накипеобразование в теплообменниках. – Теплоэнергетика — № 7. – 59.

21. Найманов А.Я., Никиша С.Б., 1983. Исследование работы антинакипного электрического аппарата. – Пром. энергетика. – №11. – 43-45.
22. Найманов А.Я., Найманова А.А., Антоненко С.Е., 2001. Прогрессивный метод снижения накипеобразования. – Проблемы экологии: Донецкий национальный технический университет – Донецк. – 1'2001. – 17-21.
23. Пермяков Б.А., Попета В.В., 2002. Исследование экологически чистых безреагентных систем очистки воды в котельных установках и системах теплоснабжения. – Энергосбережение и водоподготовка. – №3 — 80.
24. Постановление Кабинета Министров Украины № 929 от 7.08.1966 «Про посилення контролю за режимами споживання електричної і теплової енергії».
25. Постановление Кабинета Министров Украины № 148 от 5.02.1997 «Про комплексну державну програму енергозбереження України»/ Зібрання законодавства України, 2/1997 ст.243 от 1991г.
26. Фархадов А. А., 1964. Электрохимический метод борьбы с накипью. – Баку: Азерб. гос. издат. – 104.
27. Яковлев С.В., Краснобородько И.Г., Рогов В.М., 1987. Технология электрохимической очистки воды: [учебник] – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние. – 312.
28. Katz W., 1972. Electrodialysis preparation of boiler feed and other demineralized Waters. – Amer:Power conf. – Chicago. – vol.33.
29. Rosset R, Mercier D, S Douville, 1997. The extent to furring of the waters by electrochemical methods and processes preventatives. – Ann Grant, Exp, Chim, – January-February-March, – 90 No. 938, – 41-65.
30. Shigory Itoi, Ikuo Nakamura, 1978. Water Desalination by Electrodialysis. – Chem. Economy Eng. Rev. – January. – vol.10, №1 (113).

RESEARCH WATER CHEMICAL THE MODE OF THE DIRECT-FLOW BOILER AT FEED BY THE WATER WHICH HAS PASSED ELECTROCHEMICAL WATER TREATMENT.

Summary. In article the results of researches of the process of scaling in the boiler at feed electrochemically treated water. The dependences of the intensity scale formation on the depth of softening make-up water and the intensity of scaling on the heating element of the boiler. The results of check the stability of the detected effect of action anti-scale electrolysis of make-up water on scurf at the surface of the heating steam boiler at its long-term operation.

Key words: electrochemical softening, specific consumption of electricity, the intensity of scaling.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СТРУКТУРЫ ПОТОКА В СИСТЕМЕ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ЖИДКОСТИ ПОД ВАКУУМОМ

Виктор Нездойминов, Виталий Рожков, Надежда Григоренко, Дмитрий Заворотный

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры
Адрес: Украина, г. Макеевка, ул. Державина 2
E-mail: vk_dgasa@ukr.net, vitolione@ukr.net, n_grig86@mail.ru, dmzavor@mail.ru

Аннотация. Рассмотрен вопрос движения двухфазного потока жидкость/газ на участке сети системы вакуумной канализации, предложена модель работы и расчет потерь давления по длине одного участка с учетом гидродинамических особенностей. Уточнен расчет градиента давления при расслоенной структуре движения газожидкостной смеси.

Ключевые слова: двухфазный поток, структура потока, потери давления, вакуумная канализация

ВВЕДЕНИЕ

Во многих странах мира доля населения, проживающего в не оснащенных системами канализации поселениях, составляет от 5 до 20 % [6]. В последние годы наблюдается повышенное внимание к вопросам строительства и эксплуатации канализации в малых населенных пунктах. Многие международные конференции в Европе были посвящены данной теме - поиску оптимальных решений по сбору и очистке сточных вод малых населенных пунктов [3, 4, 6]. Большой интерес к этой теме обусловлен тем, что, несмотря на небольшую долю населения, проживающего в сельских поселениях, не подключенных к централизованной канализации, масштабы загрязнения окружающей природной среды неочищенными сточными водами по-прежнему очень велики. При проектировании, строительстве и эксплуатации систем канализации в малых населенных пунктах на практике возникает ряд экономических, технических, гигиенических и экологических проблем.

К малой канализации относятся сети и сооружения, предназначенные для своевременного сбора, быстрого отведения (транспортирования) и очистки бытовых и близких к ним по своему составу производственных сточных вод в количестве до 1400 м³/сутки. Норма водоотведения бытовых сточных вод в малых населенных пунктах при наличии благоустроенных домов, а именно с централизованным водоснабжением, обычно от 125 до 160 л/сутки на одного человека. В неблагоустроенных районах нормы водоотведения принимаются из расчета от 25 до 50 л/сутки на одного жителя за счет сброса в канализацию сточных вод сливными станциями и коммунально-бытовыми предприятиями [8, 18].

На сегодняшний день отсутствие коммунальных сетей и сооружений для сбора и очистки сточных вод характерно для малых населенных пунктов, а также для части территорий

малоэтажного жилищного строительства больших городов. По официальным данным Министерства регионального развития, строительства и жилищно-коммунального хозяйства Украины, централизованными системами водоотведения обеспечено всего лишь 5,6% общей их численности.

Для решения этой проблемы есть несколько подходов – это создание групповых систем водоотведения, обслуживающих группы населенных мест, с крупными сооружениями для очистки сточной воды или устройство локальных систем водоотведения малой производительности, обслуживающих отдельные населенные пункты, группы зданий, отдельные коммунальные сооружения, с малыми установками для обработки стоков.

Для транспортирования малых расходов сточных вод наиболее рационально и экономически оправдано использование вакуумной канализации. Ее применение обосновано для населенных пунктов с малой плотностью заселения, а также для объектов временного пользования (лагеря, пансионаты, кемпинги), санитарных зон водоисточников. Причем при проектировании и строительстве данной системы не возникает проблем с высоким уровнем грунтовых вод и сложных грунтовых условий. Более подробно об использовании вакуумной системы канализации рассмотрено авторами в [13].

Данная система уже получила широкое распространение в мире, благодаря ряду преимуществ перед самотечной канализацией. Но, на сегодняшний день, сдерживающим фактором ее повсеместного распространения является отсутствие алгоритма расчета, который имеет под собой теоретическую базу, а не интуитивные методы. Сложность создания расчетных формул заключается в особенностях транспортирования сточных вод под действием вакуума, а именно – транспортировку двухфазной среды «жидкость-газ». В Украине систему вакуумной канализации представляют несколько зарубежных представителей, наиболее

известной является немецкая фирма Roediger Vacuum[18].

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Изучению движения двухфазных потоков в вертикальных и горизонтальных трубопроводах в последние годы уделено большое внимание [1, 2, 5, 15-17, 19, 20]. Это объясняется значимостью данной проблемы во многих областях науки и техники, в том числе в системах вакуумного транспортирования сточных вод.

Описание внутрифазных процессов и взаимодействий в гетерогенных средах довольно сложно. Поэтому, для получения приемлемых результатов для практического применения зачастую пользуются различными допущениями и упрощениями. Исследования в области движения газожидкостных потоков в трубопроводах проводились многими отечественными и зарубежными учеными, а именно: Армандом А.А., Кутателадзе С.С., Нигматулиным Р.И., Г. Уоллисом, Д. Верслоисом, Крыловым А.П., Мамаевым В.А., Одишарией Г.Э., Д. Чисхолмом, Дж. Хьюиттом, Лабунцовым Д.А. И. Тейтелом, А. Даклером и др.

Авторами статьи уже была сделана попытка создания математической модели и расчета системы вакуумной канализации[14]. В данной работе более детально рассматривается модель движения водовоздушной смеси в системе вакуумной канализации и конкретно участок с расслоенной структурой движения.

В работах [1,5, 10-12, 15, 16, 19, 20] теоретически и экспериментально изучены основные гидродинамические особенности газожидкостных потоков: типы течения, газосодержание, потери давления и т.д. Но все эти исследования и полученные параметры имеют ощутимую погрешность, связанную с большим количеством переменных, характеризующих двухфазное течение. Вот некоторые из этих переменных: массовый расход, плотности и вязкости жидкости и газа, поверхностное натяжение, шероховатость внутренней поверхности труб, наклон трубы к горизонту. Для понимания сути двухфазного движения представление о структуре потока (режиме движения) имеет большое значение, т.к. существенно влияет на определение потерь давления на отдельном расчетном участке. Изучению структуры потока и ее влияния на градиент давления в трубопроводе также посвящено множество научных трудов [1, 10, 20]. Установлено, что структура двухфазного потока существенно зависит от расположения трубопровода относительно горизонта и направления движения фаз [5].

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью работы является математическое описание газожидкостной структуры потока и уточнение расчетной зависимости при транспортировании жидкости под действием вакуума.

Задачами работы является, определение расчетных параметров двухфазных потоков и потерь давления в системе транспортирования жидкости под действием вакуума.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Основной процесс, протекающий в системе вакуумной канализации - это движение сточной жидкости в трубе с наклоном к горизонту не более 10° под действием вакуума и расширения воздуха, забираемого из атмосферы с помощью самозадействующих клапанов специальной конструкции [7]. Поэтому для описания параметров движения сточных вод в данной системе является важным изучение двухфазных потоков типа жидкость-газ.

Движение газожидкостной смеси в системе вакуумной канализации начинается от клапана или водо-воздухопускного устройства (ВВВУ) до первого перепадного колена, в котором движение останавливается до повторного открытия ВВВУ. При этом, происходит частичное накопление сточной жидкости в перепадном колене (рис. 1).

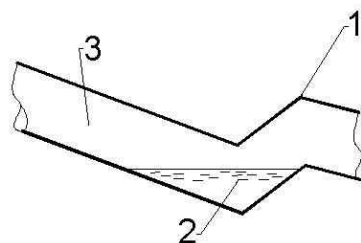


Рис. 1. Элемент вакуумного трубопровода с перепадным коленом при закрытом ВВВУ
1 – перепадное колено; 2 – накопление сточной жидкости

Fig. 1. Element of vacuum pipe with the closed valve
1 – dropping elbow; 2 – accumulation of wastewater

При повторном открытии ВВВУ в систему попадает новая порция сточной жидкости и воздуха, движение водовоздушной смеси на участке трубопровода продолжится, при этом накопленный объем жидкости (2) под действием расширившегося воздуха переходит на следующий отрезок сети, ограниченный перепадными коленами. Следовательно, можно сказать, что движение газожидкостной смеси от одного перепадного колена к последующему, вплоть до вакуумной

станции, повторяется, а, значит, расчет системы можно свести к расчету отрезка сети, ограниченному перепадным коленом и началом следующего перепада.

Основным параметром, предопределяющим эффективную работу системы и выбор оборудования при вакуумном транспортировании, является величина создаваемого в сети вакуума, который в свою очередь зависит от потерь энергии на участках трубопровода. Это значит, что расчет системы в первую очередь должен быть направлен на учет всех потерь энергии в системе, в результате чего можно определить расчетную величину вакуумметрического давления.

При расчете систем для транспортировки двухфазных смесей очень важно правильно определить плотность смеси, которая в свою очередь зависит от газосодержания. В динамике газожидкостного потока обычно различают три параметра, относящихся к газосодержанию: истинное объемное газосодержание, объемное расходное газосодержание и массовое расходное газосодержание [1, 11, 15, 17, 20].

Истинным объемным газосодержанием, φ , называется усредненное по времени текущее объемное содержание газа:

$$\varphi = \frac{dV_G}{dV},$$

dV_G – усредненный по времени объем газа в элементарном объеме dV . Истинное объемное газосодержание также может быть выражено через приведенные и истинные скорости газа или жидкости:

$$\varphi = \frac{v_G^{np}}{v_G} = 1 - \frac{v_L^{np}}{v_L},$$

где v_G^{np} , v_L^{np} – приведенные скорости газа и жидкости (отношение среднего по времени объемного расхода данной фазы через поперечное сечение потока к полной площади этого сечения), м/с;

v_G , v_L – истинные скорости газа и жидкости соответственно (отношение среднего по времени

объемного расхода данной фазы к площади сечения потока, занятой только этой фазой), м/с.

Объемное расходное газосодержание ε определяется через объемные расходы газа и водовоздушной смеси.

$$\varepsilon = \frac{dQ_G}{dQ},$$

где dQ_G – средний по времени объемный расход газа через элементарную площадку, м³/с;

dQ – средний по времени объемный расход водовоздушной смеси через элементарную площадку, м³/с.

В некоторых случаях (в гомогенных потоках) истинное объемное φ и объемное расходное газосодержание ε могут считаться равными [10 - 12]. Поток не является гомогенным при различных скоростях составляющих его фаз, следовательно, газосодержания φ и ε не совпадают.

Для систем вакуумной канализации значение объемного расходного газосодержания ε и скорости водовоздушной смеси могут быть получены экспериментально.

В лабораторных условиях смонтирована экспериментальная установка для получения основных гидродинамических параметров системы, которая выполнена из пластмассовых труб длиной 26 м, имеющих уклон в сторону движения перекачиваемой жидкости и перепадные колена, выполненное из прозрачного гибкого шланга. Вода забирается из мерной емкости в ресивер, где вакуум-насосом создается некоторое вакуумметрическое давление. После заполнения ресивера жидкость перекачивается обратно в мерную емкость центробежным насосом. В начале трубы и на ресивере установлены вакуумметры для измерения создаваемого вакуума и потерь давления в системе. Подача жидкости и атмосферного воздуха осуществляется с помощью ВВУ. При проведении экспериментов измерялись показания вакуумметров, объем забираемых жидкости и воздуха, время прохождения водовоздушной смеси по всей длине экспериментального участка.

Схематическое изображение лабораторной установки представлено на рисунке 2.

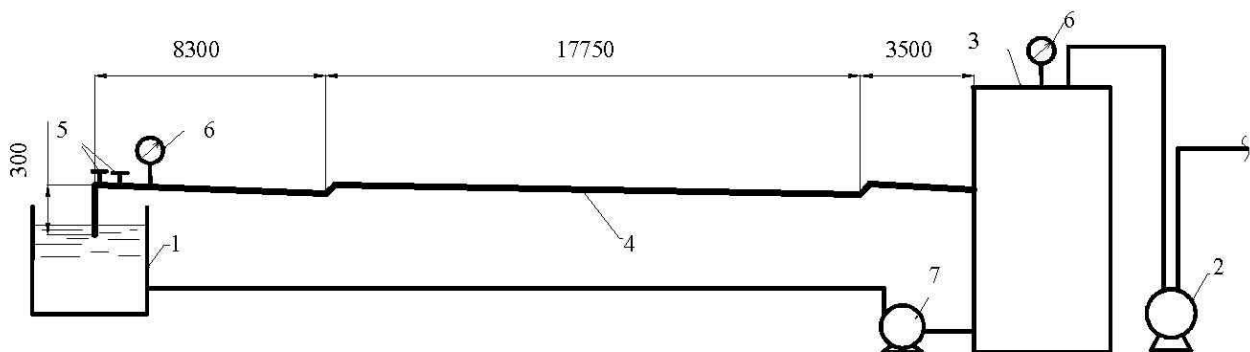


Рис. 2. Схема лабораторной установки, работающей по принципу вакуумной системы.

1 – мерная емкость; 2 – вакуум-насос; 3 – ресивер; 4 – пластмассовый трубопровод, 5 – ВВВУ; 6 – вакуумметр; 7 – циркуляционный насос

Fig. 2. Scheme of the laboratory setup that works on the principle of vacuum system
1 - dimensional tank 2 - vacuum pump; 3 – receiver; 4 – plastic pipe; 5 – WACI (item for coming of water-air), 6 - vacuum gauge; 7 - circulation pump

Экспериментальное исследование транспортирования жидкости под вакуумметрическим давлением проводилось с использованием трубопроводов диаметром 20 мм и 50 мм. Определено, что максимальная скорость водовоздушной смеси v_s достигается при объемном расходе газосодержания $\epsilon = 0,71-0,74$. При таком значении соотношения газ-жидкость $Q_G/Q_L = 0,3-0,4$ [7]. Полученная в лабораторных условиях зависимость скорости водовоздушной смеси и газосодержания ϵ при создаваемом отрицательном давлении $P = 4 \text{ м.вод.ст.}$ представлена на рис. 3.



Рис. 3. Зависимость скорости водовоздушной смеси v_s от газосодержания ϵ при вакуумметрическом давлении $P = 4 \text{ м.вод.ст.}$

Fig. 3. The velocity of gas-water mixture v_s in dependence from the gas content ϵ (negative pressure $P = 4 \text{ m}$)

На определение плотности смеси также влияет распределение фаз по длине трубопровода, что в свою очередь зависит от структуры движения. Для определения режима движения газожидкостной смеси под действием вакуума на лабораторной установке был проведен ряд экспериментов. Отличием лабораторной модели для проведения испытаний на определение структуры движения от лабораторной модели описанной выше является наличие прозрачных вставок из стеклянных трубок, в которых наблюдался и фиксировался режим движения двухфазного потока. В результате

испытаний было определено, что режим движения в системе изменяется по длине трубопровода, что, вероятно, связано с особенностью устройства системы вакуумной канализации. Рассматриваемый участок трубопровода с размеченными диапазонами изменения структуры потока представлен на рисунке 4.

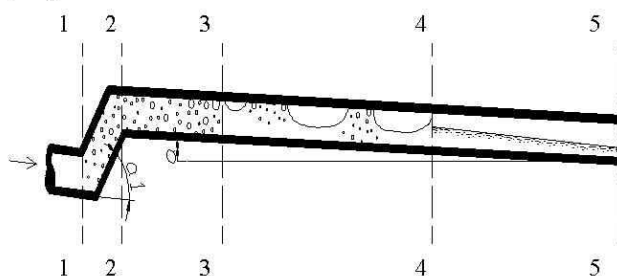


Рис. 4. Движение газожидкостной смеси на участке вакуумного трубопровода. Сечения 1-2 и 2-3 – пузырьковая структура, сечение 3-4 – снарядная структура, сечение 4-5 – расслоенная структура движения.

Fig. 4. The movement of gas-liquid mixture in the pipeline of vacuum network. Crosssections 1-2 and 2-3 – DispersedBubbleFlow, 3-4 – SlugFlow, 4-5 – StratifiedFlow

Как уже было отмечено, вакуумный трубопровод является нисходящим трубопроводом, т.е. расположен под углом к горизонту. Главное отличие горизонтальных и наклонных к горизонту каналов – в несимметричности гравитационных сил относительно оси канала. Это вызывает смещение газовой фазы к верхней образующей, а жидкой – к нижней. Поэтому, угол наклона к горизонту также является важным фактором при расчете транспортирования двухфазных смесей.

На основании вышесказанного, расчет системы необходимо выполнять для каждого участка, на котором происходит изменение структуры движения, отдельно, с учетом гидродинамических параметров, которые влияют на величину градиента давления именно на этом участке.

Математическое моделирование транспортирования газожидкостной смеси под действием вакуума уже описывалось авторами в [14]. Модель работы выполнена для одного участка сети в период времени от открытия ВВВУ до прохождения газожидкостной смесью расстояния, равного длине участка.

$$\Delta P = \int_0^{x_{1-2}} \left(\frac{dP}{dx} \right) \cdot x_{1-2} + \int_{x_{1-2}}^{x_{2-3}} \left(\frac{dP}{dx} \right) \cdot x_{2-3} + \int_{x_{3-i}}^{x_{i-j}} \left(\frac{dP}{dx} \right) \cdot x_{i-j}, \text{ [Па]}$$

При моделировании процессов вакуумного транспортирования водовоздушной смеси были приняты следующие допущения:

- значение скоростей движения смеси жидкость-газ, газа и жидкости принимались равными;
- каждая фаза движения сменяет одна другую последовательно,
- воздух не вырывается перед жидкостью до момента изменения структуры потока и движение происходит плавно, сменяясь одно другим.

Рассмотрим каждый участок в отдельности. Определим удельные потери давления на участке 1-2:

$$\left(\frac{dP}{dx} \right)_{1-2} = \rho_u \left(g \cdot \sin \alpha_1 + 2 \frac{f_s}{d} v_s^2 \right), \text{ [Па/м]}$$

где ρ_u – плотность водовоздушной смеси кг/м³, рассчитывается в зависимости от объемного расходного газосодержания ϵ .

v_s – средняя скорость движения водовоздушной смеси, м/с,

$\sin \alpha_1$ – угол наклона трубопровода к горизонту; на участке 1-2, °,

f_s – коэффициент Фаннинга водовоздушной смеси, определяется по эмпирическим зависимостям в зависимости от числа Рейнольдса[2].

d – диаметр трубопровода, м.

Удельные потери давления на участке 2-3 представляют собой ту же зависимость, но с учетом изменения угла наклона трубопровода к горизонту:

$$\left(\frac{dP}{dx} \right)_{2-3} = \rho_u \left(-g \cdot \sin \alpha + 2 \frac{f_s}{d} v_s^2 \right), \text{ [Па/м]}$$

$\sin \alpha$ – угол наклона трубопровода к горизонту на участке 2-3, °;

Удельные потери давления на участке 3-4 представляют собой более сложную зависимость. Это обусловлено тем, что структура движения меняется на снарядную, которую упрощенно можно представить как расслоенную на участках образования пузырьков и пузырьковую в пространстве между ними. Условно структура потока с разделением ее на участки с пузырьковой и расслоенной структурой представлены на рисунке 4.

Формула, описывающая зависимость потерь давления представлена ниже:

$$\left(\frac{dP}{dx} \right)_{3-4} = -\rho_u \cdot g \cdot \sin \alpha + \frac{2f_s}{d} \rho_s \cdot v_s^2 \frac{L_s}{L_u} + \frac{4}{\pi d^2 L_u} \left(\frac{f_G \rho_G v_G^2}{2} \overline{S_G} + \frac{f_L \rho_L v_L^2}{2} \overline{S_L} \right), \text{ [Па/м]}$$

Общие потери давления в системе (ΔP) определяются для каждого участка, на котором происходит изменение структуры движения, отдельно, с учетом гидродинамических параметров, которые влияют на величину градиента давления $\left(\frac{dP}{dx} \right)$ именно на этом участке в зависимости от его длины x :

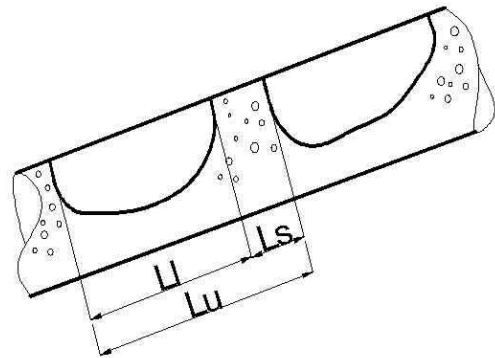


Рис. 5. Фрагмент участка 3-4 со снарядной структурой потока

Fig. 5. Fragment of area 3-4 with a slug flow structure

ρ_s – плотность водовоздушной смеси, рассчитывается в зависимости от истинного объемного газосодержания ϕ ,

$v_G = v_L$ – средняя скорость движения газа и воды соответственно, для гомогенного потока принимается равным скорости движения водовоздушной смеси v_s ,

f_G, f_L – коэффициент Фаннинга для газа и жидкости, определяется в зависимости от числа Рейнольдса [2],

$\frac{L_s}{L_u}$ –отношение длины, занимаемой жидкостью, к общей длине рассматриваемого участка,

$\frac{L_g}{L_u}$ –отношение длины, занимаемой водовоздушной смесью, к общей длине рассматриваемого участка,

$\overline{S_G}, \overline{S_L}$ – смоченный периметр газа и жидкости соответственно, берется усредненное значение по длине рассматриваемого участка.

Расчет производится с учетом критической глубины $h_{кр}$, определенной исходя из уравнения удельной энергии сечения [9].

$$\left(\frac{dP}{dx}\right)_{4-5} = -\rho_s \cdot g \cdot \sin \alpha + \frac{4}{\pi d^2 L_u} \left(\frac{f_G \cdot \rho_G \cdot v_G^2}{2} S_G + \frac{f_L \cdot \rho_L \cdot v_L^2}{2} S_L \right), \text{ [Па/м]}$$

Допущения, которые были приняты при моделировании данной системы, могут считаться верными для гомогенного потока. Однако, расслоенный режим движения, наблюдаемый на участке 4-5, независимо от характера разделения течения, к гомогенным потокам не относится. Следовательно, на данный участок допущение о равенстве скоростей $v_G = v_L$ не распространяется.

Метод определения скоростей движения газа и жидкости изначально зависит от характера разделения течения.

Если скорости фаз не превышают скорости самотечного движения жидкости в тех же условиях – разделение считается полным. Для данной структуры потока разделение может быть устойчивым и неустойчивым. Устойчивая разделенная структура наблюдается на постоянно нисходящих участках, а неустойчивая – в случае смены нисходящих и восходящих участков [12]. В трубопроводе, транспортирующем жидкость под действием вакуумметрического давления, участок 4-5 представляет собой постоянно наклонный трубопровод, что свидетельствует об устойчивом характере расслоения потока.

В случае, когда скорость газовой фазы превышает скорость жидкости в самотечном режиме, на поверхности разделения фаз образуются волны. Такую структуру потока называют расслоенно-волновой.

Чтобы определить скорости движения газа v_G и жидкости v_L на участке с устойчивым расслоенным характером разделения, необходимо для этого участка рассчитать истинное

$$\frac{2.38 \cdot (1 - \rho') \cdot \varphi^2 (1 - \varphi)^2}{(1 - \varepsilon)^{1.75} \cdot \varphi^2 - 1.19 \cdot \rho' \left(\frac{v_G}{v_L}\right)^{0.25} \cdot (2 - \varphi) \cdot (1 - \varphi)^2 \cdot \varepsilon^{1.75}} = \left(\frac{\lambda \cdot Fr}{2|\sin \alpha|}\right)^{0.575}$$

где λ – параметр, используемый для наклонных нисходящих каналов, определяется при помощи трансцендентного уравнения [12]:

$$\lambda = 0.067 \cdot \left[\frac{158 \cdot v_L \sqrt{\lambda}}{(2g \cdot d \cdot |\sin \alpha|)^{0.5} \cdot d} + \frac{2\Delta}{d} \right]^{0.2}$$

Δ – шероховатость внутренней поверхности трубы, м,

ρ' – отношение плотности газа ρ_G к плотности жидкости ρ_L при угле наклона к горизонту меньше нуля,

$$Fr - \text{критерий Фруда, } Fr = \frac{v_L^2}{g \cdot L}$$

Участок 4-5 имеет расслоенную структуру потока, для определения удельных потерь давления используется зависимость:

$$\varphi = \left(\frac{\lambda \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot Fr}{2|\sin \alpha|} \right)^{0.4}$$

газосодержание φ , которое связано с объемным расходным газосодержанием ε следующей эмпирической зависимостью [12]:

Данная зависимость применима при $0 < \frac{\lambda \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot Fr}{2|\sin \alpha|} < 0.18$. В случае,

когда $0.18 < \frac{\lambda \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot Fr}{2|\sin \alpha|} < 1$ зависимость истинного и объемного газосодержаний приобретает вид:

$$\varphi = 0.615 \cdot \left(1 - \frac{\lambda \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot Fr}{2|\sin \alpha|} \right)$$

При невыполнении условия $\frac{\lambda \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot Fr}{2|\sin \alpha|} < 1$

можно считать, что разделение потока неполное и на поверхности жидкой фазы образуются волны. Структура движения становится расслоенно-волновой.

Для данного характера расслоения справедлива следующая эмпирическая зависимость между истинным объемным и объемным расходным газосодержаниями [12]:

Для упрощения математических расчетов за основной линейный размер L принимается эквивалентный диаметр d , сечения, занимаемого жидкостью при полном устойчивом расслоении потока. В случае расслоенно-волнового режима движения значения d , принимается аналогично. Формула для определения d , получена с учетом рис. 6.

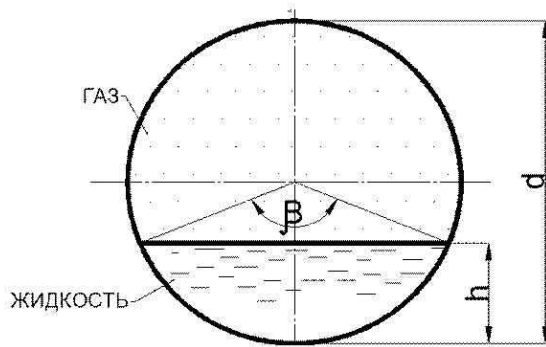


Рис. 6. Сечение трубопровода с расслоенным потоком водовоздушной смеси

Fig.6. Section of pipeline with the stratified flow of water-air mixture

$$d_3 = 4R,$$

где R – гидравлический радиус, м:

$$R = \frac{\omega_L}{\chi},$$

где ω_L – площадь сечения, занимаемый жидкостью, m^2 .

χ – смоченный периметр, м;

$$\chi = \pi d \frac{\beta}{2\pi},$$

где β – угол из рис. 6.

$$\omega_L = \omega(1 - \phi),$$

ω – полная площадь поперечного сечения трубопровода, по которому происходит расслоенное движение водовоздушной смеси, m^2 .

Из вышеприведенных зависимостей выразим d_3 :

$$d_3 = \frac{4\omega(1-\phi)}{\pi d \frac{\beta}{2\pi}}, [M].$$

На основании рис. 5 выразим h :

$$h = \frac{d}{2} - \frac{d}{2} \cos \frac{\beta}{2}, [M],$$

откуда β равно:

$$\beta = 2 \arccos \left(1 - 2 \frac{h}{d} \right),$$

С учетом вышеприведенных преобразований, d_3 равняется:

$$d_3 = \frac{\pi d (1-\phi)}{\arccos \left(1 - 2 \frac{h}{d} \right)}, [M].$$

В результате решения системы уравнений из вышеприведенных зависимостей с помощью программы Mathcad возможно численно определить значение истинного объемного газосодержания ϕ для любого характера расслоения.

Приведенная скорость газа $v_G^{пр}$ определяется:

$$v_G^{пр} = \frac{Q_G}{\omega}, [M/c],$$

где Q_G – объемный расход газа, определяемый экспериментально, m^3/c .

Истинная скорость газа v_G определяется:

$$v_G = \frac{v_G^{пр}}{\phi}, [M/c].$$

Зная истинную скорость движения газа v_G , можно определить площадь поперечного сечения, занятого газом ω_G :

$$\omega_G = \frac{Q_G}{v_G}, [M^2].$$

Площадь сечения, занимаемая жидкостью ω_L в таком случае составит:

$$\omega_L = \omega - \omega_G, [M^2].$$

Истинная скорость движения жидкой фазы составит v_L :

$$v_L = \frac{Q_L}{\omega_L}, [M/c].$$

Таким образом, полученная зависимость учитывает различные структуры потока и позволяют определить потери давления на одном участке вакуумной системы транспортирования жидкости.

ВЫВОДЫ

Анализ литературных источников показал, что на сегодняшний день вопрос канализования малых населенных пунктов стоит не только перед Украиной, но и перед многими государствами мира. Во многих местах его уже решают с помощью альтернативных способов канализования, а именно с применением вакуумной системы канализации, но применение этой системы не имеет глубокого научного обоснования и строгих математических зависимостей.

В данной статье рассмотрены предпосылки математического описания движения жидкости и газа под действием вакуумметрического давления.

Предложен метод расчета потерь давления с учетом изменения газожидкостной структуры потока для участка трубопровода при транспортировании жидкости под вакуумом.

Установлено:

- расчетная зависимость для определения потерь давления в системе вакуумного транспортирования жидкости отображает зависимость от основных гидродинамических характеристик, что делает ее довольно гибкой в ее применении для различных условий проектирования;

- расчет всей системы транспортирования жидкости под действием вакуумметрического давления может быть сведен к расчету одного участка;

- при пузырьковом и снарядном режимах движения поток гомогенный, скорости жидкой и газовой фаз одинаковы и принимаются равными скорости водовоздушной смеси;

- на участок с расслоенным или расслоенно-волновым режимом движения допущение о гомогенности потока не распространяется, следовательно, для расчета данного участка необходимо предварительно определить скорость газовой и жидкостной фаз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Christopher E. Brennen, 2008. Fundamentals of Multiphase Flows: California Institute of Technology. - Pasadena, California, - 410.
2. Jing-yu Xu, Ying-xiang Wu, Zai-hong Shi and other, 2007. Studies on two-phase co-current air / non-Newtonian shear-thinning fluid flows in inclined smooth pipes. International journal of Multiphase flow. - Vol. 33. - 948-969.
3. Kapteina U., 1999. Dezentrale Abwasserreinigung im ländlichen Raum. Neue Landschaft. - N 6. - 388-390.
4. Schreff D., Wilderer P., 1999. Kleine Kläranlagen. Korrespond. Abwasser. - Vol. 46, N 10. - 1522-1525.
5. Trostinsky E., Shemer L., Barnea D., 2004. Gas-liquid interfacial distribution in inclined downward pipe flow. - Warsaw. : ICTAM 2004.
6. Watanabe Y., 1997. Small wastewater treatment plants III. Water Science and Technology. - Vol. 35, N 6. - 1-154.
7. Григоренко Н.И., 2011. Исследование параметров основных элементов гидродинамической вакуумной системы канализации в лабораторных условиях: Вестник ДонНУСА. - Макеевка. - №2011-3(89). - 110-112.
8. Зайченко Л., Синежук И., 2012. Анализ реального водопотребления в жилищном фонде. MOTROL. - Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences. - Lublin. - Vol. 14.1. - 54-57.
9. Киселев П. Г., 1972. Справочник по гидравлическим расчетам. Изд 4-е, переработ. и доп. М.: «Энергия».
10. Лабунцов Д.А., Ягов В.В., 2000. Механика двухфазных систем [Учебное пособие для вузов] - М.: Издательство МЭИ. - 374.
11. Мамаев В.А., Одишария Г.Э., Семенов Н.И., Точигин А.А., 1969. Гидродинамика газожидкостных смесей в трубах. - М.: Недра. - 208.
12. Марон В.И., 2012. Гидравлика двухфазных потоков в трубопроводах [Учебное пособие для вузов] - СПб.: издательство «Лань». - 256.
13. Нездойминов В.И., Григоренко Н.И., Заворотный Д.В., 2010. Применение вакуумной канализации для малых населенных пунктов в Украине, Науковий вісник будівництва №2010-60.
14. Нездойминов В.И., Рожков В.С., Григоренко Н.И., 2012. Модель работы и расчет потерь давления на участке трубопровода системы вакуумной канализации. Науковий вісник будівництва: ХДТУБА. - Харьков. - вып. 70. - 312-317.
15. Нигматулин Р.И., 1987. Динамика многофазных сред, в 2-х частях - М.: «Наука».
16. Ситенков В.Т., 2006. Гидравлика. Теория и расчет двухфазных систем - Нижневартовск, - 121 с.
17. Уоллис Г., 1972. Одномерные двухфазные течения - М.: «Мир». - 440.
18. Чередниченко И.Л., 2009. Вакуумная канализация - инновационная технология для сбора сточных вод. Сантехника. Отопление. Кондиционирование. - №1. - 16-19.
19. Чермошнцева А.А., Шулюпин А.Н., 2011. Математическое моделирование пароводяных течений в элементах оборудования геотермальных промыслов: [Монография] - Камчат ГТУ. - Петропавловск-Камчатский. - 144.
20. Чисхолм Д. 1986. Двухфазные течения в трубопроводах и теплообменниках: Пер. с англ. - М.: Недра. - 204.

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF FLOW STRUCTURE IN THE VACUUM GAS-LIQUID TRANSPORT SYSTEM

Summary. We consider a problem of the movement of two-phase flow liquid/gas in the vacuum sewer system. The calculation model of pressure losses along the length of one section taking into account the hydrodynamic characteristic was proposed. Calculation of the pressure gradient in the stratified structure of movement of gas-liquid mixture was refined.

Key words: two-phase flow, flow structure, pressure loss, the vacuum sewer system

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ СООРУЖЕНИЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД МОЛОКОЗАВОДОВ

Степан Эпоян, Станислав Фомин

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры
Адрес: Украина, г. Харьков, ул. Сумская, 40
E-mail: fomin.stanislav1986@gmail.com

Ирина Фомина

Украинский научно-исследовательский институт экологических проблем
Адрес: Украина, г. Харьков, ул. Бакулина, 6
E-mail: fomin_niiep@mail.ru

Аннотация. В статье проанализирована проблема очистки сточных вод молокозаводов. Рассмотрены основные методы очистки сточных вод отрасли и определена их эффективность. Описаны лабораторные установки моделирующие систему аэротенк-отстойник со свободноплавающим активным илом и иммобилизованным на материале-носителе. Определена эффективность очистки модельных растворов с составом близким к составу реальных сточных вод молокозавода на лабораторных установках.

Ключевые слова: сточные воды, молокозаводы, очистка, активный ил, материал-носитель, химическое потребление кислорода.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня Украина занимает одно из передовых мест в мире по уровню развития такой отрасли перерабатывающей промышленности как пищевая. Отдельного внимания заслуживает молокоперерабатывающая промышленность, как одна из наиболее крупных по объемам производства. При этом молокозаводы являются одними из крупнейших потребителей пресной воды, а сточные воды ее предприятий относятся к категории наиболее загрязненных и сложных в обработке [2, 13, 16, 22, 26].

На молокоперерабатывающих предприятиях, как правило, образуются три вида сточных вод: производственные, хозяйственно-бытовые и сточные воды из систем охлаждения и конденсации (теплообменные) [9]. Производственные сточные воды являются наиболее загрязненными. Они образуются в результате различных технологических операций, а также при мойке емкостей и уборке производственных помещений [7, 14, 20]. Объем сточных вод, образующихся на предприятии, составляет около 85% от общего расхода пресной воды. Удельный расход сточных вод колеблется от 1,6 до 4,9 м³ на 1 т продукции, а коэффициенты неравномерности сброса сточных вод в зависимости от мощности предприятия колеблются в пределах 1,4-2,0 [25].

Сточные воды молокоперерабатывающих предприятий содержат большое количество белковых веществ и жиров, что обуславливает высокие значения биохимического и химического потребления кислорода (БПК, ХПК). Образующиеся на предприятиях молочной промышленности производственные сточные воды, содержат продукты переработки молока и выпускаемой продукции (масло, сметана, сыр), и вещества,

поступающие в сточные воды от эксплуатации оборудования применяющегося на производстве [11].

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

При эксплуатации молочных заводов, расположенных в крупных городах, загрязненные сточные воды отводят в систему городской канализации или на собственные очистные сооружения для предварительной обработки [12, 10].

При проектировании молокозаводов в 70-80-е годы прошлого столетия считалось, что сточные воды данного производства не несут какой-либо опасности для городских очистных сооружений. Часть сыворотки извлекалась в процессе производства и вывозилась на ближайшие фермы в качестве корма скоту. Также, считалось, что сточные воды не токсичны для микроорганизмов активного ила и преимущественно загрязнены легкоокисляющимися веществами, которые при разбавлении с хозяйственно-бытовыми сточными водами полностью могут быть обработаны на городских очистных сооружениях. В результате практически все молокозаводы, расположенные в черте городов и имеющие доступ к городской канализации, не имели в своем составе локальных очистных сооружений.

Большинство запроектованных и построенных предприятий молокоперерабатывающей промышленности еще в XX столетии сохранились и работают ныне. Так, сегодня, на многих крупных молокозаводах, расположенных в больших городах и районных центрах Украины, не только отсутствуют какие-либо локальные очистные сооружения, но, и не предусмотрена территория для их размещения [27].

Те немногие молокоперерабатывающие предприятия, имеющие очистные сооружения, которые также проектировались 30 - 40 лет тому назад не рассчитывались на удаление соединений азота и фосфора до требований действующих сегодня нормативов, так как по действующим на то время законодательным документам необходимо было обеспечить полную биологическую очистку сточных вод [18].

В настоящее время, сыворотка, образующаяся на молокоперерабатывающих предприятиях, как сырье для добавки в корм скоту не используется. Суточные объемы сыворотки на крупных молокозаводах могут достигать до 150-200 м³/сут. Такие количества высококонцентрированного, быстро закисающего сырья, как правило, сегодня, сбрасывают в систему водоотведения города. Пришедшие на смену натуральному молоку сырьевые полуфабрикаты, слив молочной сыворотки в систему водоотведения, качество исходной пресной воды – все это отразилось на составе сточных вод. Поступающие высококонцентрированные сточные воды молокозаводов без достаточного разбавления хозяйственно-бытовыми городскими сточными водами, сегодня, оказывают негативное влияние на городские очистные сооружения. Повышенные концентрации соединений азота, фосфора, поверхностно активных и органических веществ в сточных водах молокозаводов приводят к нарушению работы в первую очередь сооружений биологической очистки. При поступлении указанных веществ в сооружения биологической очистки нарушаются седиментационные свойства активного ила, что приводит к ухудшению осаждаемости, и в последствии, выносу его из очистных сооружений [5, 6, 15, 17, 3].

Молочные предприятия, расположенные в малых населенных пунктах, и не имеющие возможности сброса сточных вод систему горканализации, в основном, сбрасывают свои сточные воды в ближайший водный объект и зачастую без какой-либо предварительной очистки, чем наносят необратимый вред водным экосистемам. Легкоокисляемые органические вещества, поступающие в водные объекты со сточными водами, на свое окисление расходуют большое количество кислорода, образуя, в месте сброса, условия близкие к анаэробным, что может быть смертельным для водных обитателей [1]. Вместе с активным илом из очистных сооружений выносятся патогенные микроорганизмы, что приводит к болезни и гибели рыбы, а также заражению водных источников [21]. Взвешенные вещества, присутствующие в сточных водах, оседают на дне водных объектов, что со временем вызывает процессы гниения и брожения в местах его накопления, что приводит к ухудшению органолептических характеристик водного объекта

и к его заиливанию в месте сброса сточных вод. Поступление соединений азота и фосфора способствует процессам эвтрофикации водных объектов, что особенно важно, если водный объект используется в качестве источника питьевого водоснабжения [4]. Так, отмершие водоросли и продукты метаболизма живых, значительно ухудшают органолептические свойства воды (появляется запах, ухудшается вкус, прозрачность, увеличивается концентрация взвешенных веществ) все это приводит к увеличению затрат обработки воды на станциях водоподготовки, которые расположены ниже по течению [19].

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Украина, сегодня существенно отстает от опыта Европы и России в вопросе извлечения и переработки сыворотки. Единственный завод на территории Украины по переработке сыворотки в лактозу построен и работает в пос. Воскресенское (Николаевская область). Однако, он принимает сыворотку от нескольких молокозаводов, расположенных неподалеку. Остальное в качестве отходов сливается в систему водоотведения города, нанося вред природной среде. И, к сожалению, положительной тенденции в развитии технологий по глубокой переработке сыворотки в нашей стране пока не наблюдается, что говорит о продолжении ее утилизации через систему канализации. Таким образом, единственным методом улучшения экологического состояния водных объектов на территории Украины остается эффективная очистка данного типа сточных вод на очистных сооружениях.

Так, на сегодня, вопрос обработки сточных вод предприятий пищевой промышленности Украины, содержащих в своем составе высокие концентрации жироподобных, органических, взвешенных веществ, соединений азота и фосфора является весьма актуальным. Недостаточно очищенные сточные воды несут высокую и порой необратимую угрозу водным объектам и их обитателям. Разработка новых, доступных, эффективных технологий, либо интенсификация существующих очистных сооружений острая и необходимая задача, решение которой позволит улучшить как состояние водных объектов, так и общее экологическое состояние природы на территории Украины.

Сточные воды предприятий молокоперерабатывающей промышленности, в зависимости от условий их дальнейшего сброса, подвергаются различным методам очистки: механическим, физико-химическим, биологическим и др.

Сточные воды молокоперерабатывающих предприятий характеризуются весьма благоприятным для нормального течения процесса биологической очистки соотношением БПК и ХПК,

а также БПК к азоту и фосфору [24]. Поэтому сточные воды молокозавода в подавляющем большинстве подвергаются биологической очистке всеми известными методами и практически во всех типах сооружений.

Методом интенсификации сооружений биологической очистки является повышения дозы ила в сооружениях за счет иммобилизации микрофлоры на материал носитель. Такое закрепление микроорганизмов позволяет устранить перегрузку вторичных отстойников, поскольку увеличивается концентрация ила в сооружении без существенного повышения концентрации иловой смеси, поступающей во вторичные отстойники. В качестве носителей микрофлоры используются как плавающие, так и фиксировано установленные насадки из разных материалов разной формы, что позволяет повысить дозу ила до 8-10 г/дм³ без ухудшения работы вторичных отстойников.

Применение биологических очистных сооружений с фиксированной микрофлорой наиболее целесообразно для проведения биологической очистки в режиме глубокого удаления биогенных элементов и повышенных концентраций органических веществ в поступающих сточных водах.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Анализ литературы показал, что перспективным и малозатратным методом повышения эффективности работы сооружений биологической очистки, является применение высоких концентраций биомассы иммобилизованной (прикрепленной) на материале-носителе. Изучено, что использование иммобилизации сокращает период биохимического разложения органических веществ, а также обеспечивается более глубокое удаление соединений азота и фосфора.

Одним из основных преимуществ использования иммобилизации микроорганизмов активного ила в сооружениях биологической очистки является возможность широкого варьирования концентрации биомассы, что особенно важно при очистке от специфических органических и неорганических веществ [8].

Материалы-носители должны соответствовать определенным требованиям, основными из которых являются устойчивость к биохимическому разложению, механическая прочность, низкая стоимость, малый вес. Одним из требований к материалу, используемого для прикрепления микроорганизмов, является его свойство иметь большую удельную поверхность при небольшом собственном объеме. Применение материалов с малой удельной поверхностью приводит к тому, что большой объем сооружения используется не рационально [28].

Принцип очистки сточных вод заключается в фильтровании их через загрузочный материал, покрытый биологической пленкой, образованной

колониями микроорганизмов. Проходя через биопленку загрязненная сточная вода оставляет в ней нерастворенные примеси, не осевшие в сооружениях, а также коллоидные и органические вещества, сорбируемые биопленкой.

За последнее время в мировой и отечественной практике применялись различные материалы-носители: разнообразные пластмассовые, керамические, пенопластовые, металлические и прочие загрузки [23]. Однако, от большинства материалов со временем начали отказываться т.к. в процессе эксплуатации они не всегда удовлетворяли предъявляемым требованиям.

В лабораторных условиях, были изучены физические свойства эластичного пенополиуретана (Рисунок 1) и определена эффективность интенсификации биологической очистки при использовании его как материала-носителя.

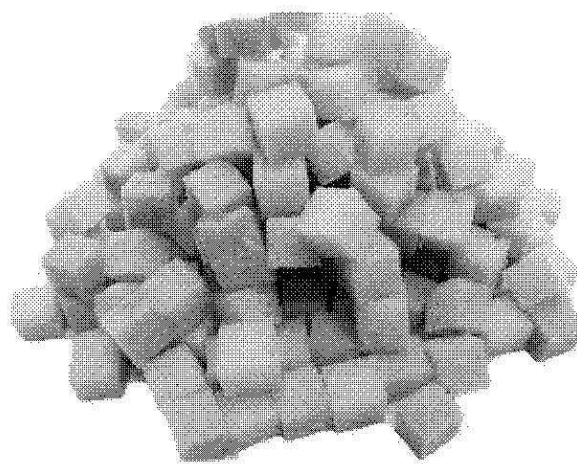


Рис. 1. Эластичный пенополиуретан
Fig. 1. Flexible polyurethane foam

Было установлено, что данный материал имеет ряд преимуществ перед другими материалами применяющихся в настоящее время по таким показателям, как пористость, устойчивость к многократным механическим нагрузкам, гидрофобность, повышенные адсорбционные свойства. Исследования проводили на эластичном пенополиуретане, изготовленного на основе простых полиэфиры окиси пропилен с пористостью 97% и размером пор 0,4-1,8 мм. Такой пенополиуретан не подвержен биохимическому разложению и устойчив к агрессивному воздействию сточных вод. Одна и та же загрузка использовалась в лабораторных установках более 2-х лет.

Испытания выполняли на двух параллельно работающих лабораторных установках имитирующих систему аэротенк-отстойник (рисунок 2), которые работали при одинаковых условиях, с расходом и концентрациями сточных вод и при одинаковых расходах воздуха.

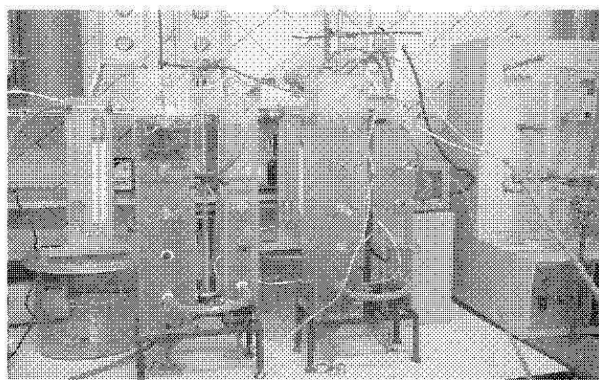


Рис. 2. Лабораторные установки
Fig. 2. Laboratory systems

В первой установке (№1) были воссозданы условия работы классических очистных сооружений со свободноплавающей микрофлорой, во-второй (№2) была отведена зона в верхней части сооружения под закрепленный материал-носитель (рисунок 3).

Аэротенки обеих установок имеют вертикальное расположение, вместимость каждого

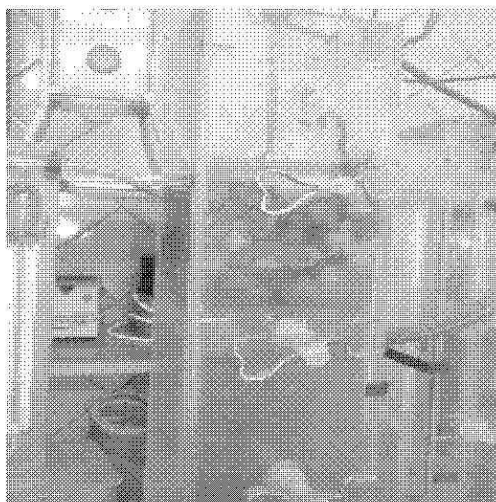


Рис.3. Материал-носитель
Fig. 3. Carrier-material

4,5 дм³. Аэротенки, соединены со вторичными отстойниками, объемом 1,5 дм³ каждый, по системе сообщающихся сосудов. Перекачивание осевшего на дне активного ила в аэротенки осуществляли при помощи системы эрлифта. Объем материала

носителя во второй установке занимал 5-ю часть сооружения.

Автоматизация процесса подачи воздуха в сооружения была обеспечена следующим образом: компрессор нагнетал сжатый воздух в ресивер, отключение и включение электродвигателя компрессора контролировали электроконтактным манометром вмонтированным в систему, который обеспечивает рабочее давление от 1 до 2 атм. Далее сжатый воздух поступает в аэрационную систему аэротенков и эрлифтов через измерительные устройства.

Непрерывность подачи модельных растворов либо реальных сточных вод в установки была обеспечена следующим образом: из буферной емкости объемом 200 л насосами-дозаторами сточные воды подавали в аэротенки с закрепленным на материале-носителе пенополиуретане. В буферной емкости были установлены погружные механические мешалки, предотвращающие оседание взвешенных веществ на дне с последующим их загниванием. За время экспериментов обе установки работали круглосуточно и непрерывно.

Оба аэротенка были заполнены активным илом отобранным из действующих аэротенков городских очистных сооружений канализации города Харькова и доставленного в лабораторию в течении 30 минут.

Концентрация активного ила на момент внесения в установки составляла 3,2 г/дм³, иловый индекс составлял 100, такой ил считается нормальным с хорошими седиментационными свойствами. После заполнения сооружения иловой смесью в аэротенки включили подачу воздуха через керамические аэраторы, расположенные на дне сооружения. Одновременно с этим в установки перистальтическими насосами-дозаторами подавали модельный раствор из буферной емкости (объем-200 л), приготовленный на основе молочной сыворотки, с концентрациями представленными в таблице 1.

Лабораторные насосы дозаторы позволяют регулировать расход сточных вод в диапазоне от 1,5 до 0,3 дм³/час, что составляет время пребывания сточных вод в сооружении соответственно от 3 до 15 часов. С целью более лояльного воздействия сточных вод на биоценоз активного ила в сооружения подавали модельные растворы с расходом не выше 0,5 дм³/час.

Табл.1. Концентрации загрязняющих веществ в модельном растворе после разбавления молочной сыворотки пресной водой

Table.1. Concentrations of pollutants in the model solution after dilution with fresh water whey

Показатели	pH	XПК	БПК ₅	Вз. в-ва	Жиры	Азот ам.	Фосфаты
Концентрации, мг/дм ³	7,31	720	480	490	2,1	68	115

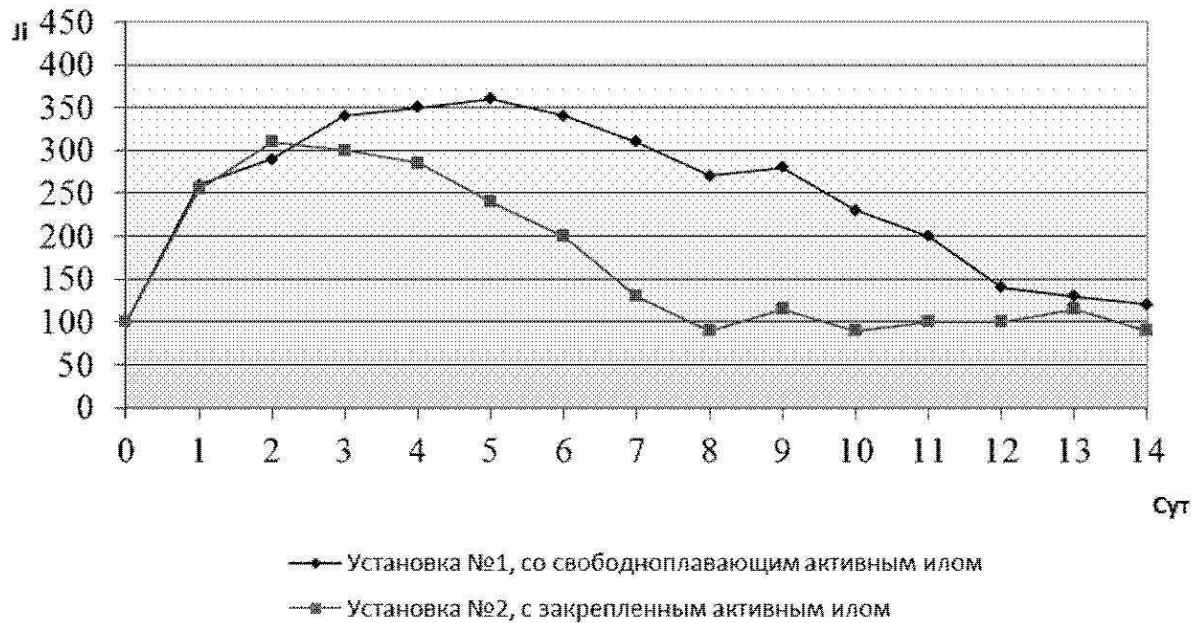


Рис. 4. Изменение концентрации активного ила в зависимости от времени пребывания
 Fig. 4. Changing the concentration of activated sludge depends on the residence time of

Оценка эффективности работы сооружений начинали по истечению процесса адаптации активного ила к характеру модельного раствора – 14 сутки. На протяжении двух недель, с целью контроля физиологических свойств активного ила, измерялся иловый индекс, который в обеих установках с первых часов работы был достаточно высоким – 240 - 290, что свидетельствует о вспухании ила и нарушении его седиментационных свойств.

Отбор проб поступающих растворов и очищенных вод после сооружения проводили после достижения значения илового индекса (J_i) в установке №1 ниже 120, что и наблюдалось через две недели после запуска аэротенков. Динамика изменения илового индекса в установках представлена на рисунке 4.

Из представленного графика видно, что значение илового индекса в первые дни существенно возросло по сравнению с исходными в обеих установках – свыше 300. Однако, в установке №2 иловый индекс начал снижаться уже на 3 сутки в отличие от аэротенка №1, у которого этот процесс начался лишь на 4-е сутки. В установке со свободноплавающим активным илом нормальный иловый индекс (80-120) был достигнут только на 14 сутки в то время как в установке №2 это значение было достигнуто еще на 8 сутки. После адаптации биоценоза активного ила из 2-х аэротенков были

отобраны пробы иловой смеси, в которых определили концентрации активного ила (a_i). В первой установке a_i соответствовал исходным концентрациям – 3,2 г/дм³, во-второй установке a_i составлял – 3,7 г/дм³, что говорит о небольшом приросте биомассы. На 14 сутки в установке № 2 визуально было заметно обрастание загрузки материала биологической пленкой.

По истечению периода адаптации активного ила в установках (14 сут.) были проведены исследования по определению эффективности очистки модельного раствора на двух установках при одинаковых условиях. В буферную емкость периодически готовилась и доливалась модельная жидкость с концентрациями близкими к составу сточных вод молокозаводов ХПК – 1000 - 1500 мгО₂/дм³, БПК₅ – 600 – 1100 мгО₂/дм³, взвешенные вещества – 600 – 800 мг/дм³, жиры 20-60 мг/дм³. Расход модельного раствора подаваемого в установки составлял 0,4 дм³/час, что соответствует времени пребывания в аэротенках – 11 часов.

Раз в сутки отбирали пробы модельных растворов, поступающие в аэротенки и на выходе из вторичных отстойников для выполнения в них основных химических анализов и определения физиологического состояния активного ила. Результаты химических анализов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Эффективность очистки модельных растворов в установках со свободноплавающим активным илом и закрепленным на материале-носителе
 Table.2. The cleaning efficiency of model solutions in systems with free-activated sludge and fixed on a support material

Химические показатели									
Поступающие концентрации и эффективность очистки	pH	XПК	БПК ₅	Вз. в-ва	Жиры	Азот ам.	Нитраты	Нитриты	Фосфаты
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Дата проведения исследования: 09.07.2012, а, №1=3,2 г/дм ³ , №2=3,7; J, №1=130, №2=95									
Исходная концентрация, мг/дм ³ (C _{исх})	6,95	1120	840	650	14	68	2,55	0,9	72
Концентрация после очистки, мг/дм ³ (C _{вых}) №1	7,11	960	690	420	13,3	62	2,5	1,15	69
№2	6,91	915	640	258	8,3	58	1,9	2,3	67,5
Эффективность очистки, % (Э)									
№1	-	14	17	35	5	9	2	-	4
№2	-	18	22	60	41	15	25	-	6
Дата проведения исследования: 11.07.2012, а, №1=3,1 г/дм ³ , №2=4,2; J, №1=130, №2=100									
C _{исх} мг/дм ³	6,92	1120	830	650	13,8	71	2,2	1,8	70
C _{вых} №1	7,02	945	680	415	13,1	61	2,1	2,4	67
№2	6,84	900	620	224	7,7	55	1,4	3,7	64
Э, №1	-	16	18	36	5	14	5	-	4
№2	-	20	25	66	44	23	36	-	9
Дата проведения исследования: 13.07.2012, а, №1=3,3 г/дм ³ , №2=4,7; J, №1=160, №2=135									
C _{исх}	6,74	1220	940	680	9,1	70	1,2	< 0,03	56
C _{вых} №1	6,63	1000	780	340	7,8	62	0,54	2,6	50
№2	6,12	950	710	211	4,2	54	0,58	4,1	46
Э, №1	-	18	17	50	14	11	55	-	11
№2	-	22	25	69	53	23	52	-	18
Дата проведения исследования: 17.07.2012, а, №1=3,5 г/дм ³ , №2=6,2; J, №1=125, №2=120									
C _{исх}	7,34	1350	1020	730	7,4	47	3,5	< 0,03	61
C _{вых} №1	7,25	1090	820	450	3,2	34	1,2	18,1	50
№2	7,18	1000	730	440	2,5	27	6,4	12,3	43
Э, №1	-	19	19	38	57	28	34	-	18
№2	-	26	28	40	66	43	-	-	29
Дата проведения исследования: 19.07.2012, а, №1=3,6 г/дм ³ , №2=7,8; J, №1=160, №2=130									
C _{исх}	7,24	1350	1010	725	7,3	48	3,5	< 0,03	59,5
C _{вых} №1	7,15	1070	820	485	3,0	34	1,3	19,4	48
№2	7,06	940	660	460	1,9	22	19,5	17,6	36
Э, №1	-	20	19	33	60	19	63	-	19
№2	-	31	35	37	74	54	-	-	39
Дата проведения исследования: 25.07.2012, а, №1=3,8 г/дм ³ , №2=12; J, №1=170, №2=155									
C _{исх}	6,87	1220	890	690	2,4	57	1,5	< 0,03	41
C _{вых} №1	6,62	950	670	450	1,1	42	17,9	12,6	32
№2	6,48	580	430	435	0,7	27	2,3	7,6	22
Э, №1	-	22	24	35	54	26	-	-	22
№2	-	52	52	37	71	53	-	-	46

продолжение табл. 2

Дата проведения исследования: 31.07.2012, а, №1=3,6 г/дм ³ , №2=18; J, №1=190, №2=140									
C _{исх.}	7,43	1430	1200	765	4,7	76	2,3	1,4	52
C _{вых.} №1	7,26	1080	860	540	1,9	54	7,8	19	35
№2	7,18	450	220	510	0,6	14	6,3	8,9	20
Э, №1	-	25	28	29	60	30	-	-	33
№2	-	69	82	33	87	82	-	-	62
Дата проведения исследования: 06.08.2012, а, №1=3,8 г/дм ³ , №2=20; J, №1=210, №2=160									
C _{исх.}	7,83	1360	1140	675	3,9	46	1,7	<0,03	39
C _{вых.} №1	7,64	1000	810	440	1,2	29	8,1	14	25
№2	7,53	510	420	430	0,7	13	6,3	11,2	17,5
Э, №1	-	27	29	35	69	36	-	-	36
№2	-	63	63	36	82	72	-	-	55

Из представленной таблицы видно, что на протяжении 4-х недель проведения исследований установка № 2 обеспечивала более эффективное удаление всех представленных химических компонентов. В отличие от аэротенка со свободноплавающим илом, где доза ила за все время не превышала 4 г/дм³, в установке с иммобилизацией биоценоза концентрация активного ила была достигнута свыше 20г/дм³. Необходимо отметить, что при повышении дозы ила в сооружении в №2 более 18 г/дм³ ухудшалась эффективность очистки по органическим веществам и биогенным элементам, а наиболее высокая эффективность очистки наблюдалась при дозе ила от 12 до 18 г/дм³. При таких дозах активного ила достигается эффективность очистки по ХПК – 69%, азоту аммония – 82%, фосфатам – 62 %.

Также преимуществом установки № 2 является более глубокое удаление соединений азота. Установлено, что процессы денитрификации активно проходят в установке №2, что выражается в снижении концентраций нитритов и нитратов, в отличие от установки №1, где эти процессы практически незаметны. Наличие пор в пенополиуретане обеспечивает возможность части микроорганизмов проникать во внутренние слои загрузки и при обрастании там формируются условия близкие к анаэробным. Другими словами, во внутренних порах создаются анаэробные условия в которых находятся факультативно анаэробные микроорганизмы. Благодаря этому, в установке №2 при обрастании материала-носителя развиваются как аэробные так и анаэробные микроорганизмы, что позволяет протекать процессам нитри-денитрификации в одном сооружении, благодаря чему существенно экономится объем сооружения.

ВЫВОДЫ

1. На основании изучения литературных источников можно сделать вывод, что иммобилизация микроорганизмов на различных носителях повышает интенсивность физиолого-биохимических процессов и улучшает седиментационные свойства активного ила.

2. На лабораторных установках было доказано преимущество эффективности очистки с иммобилизацией микроорганизмов в сравнении со свободноплавающим активным илом. В качестве носителя используется пенополиуретан эластичный, изготовленный на основе простых полиэфиров окиси пропилена с пористостью 97 %.

3. Использование иммобилизации микроорганизмов позволяет проводить процессы нитри-денитрификации в одной емкости, что обеспечивает нормативное содержание аммонийного азота без введения дополнительных установок.

4. По результатам проведенных экспериментальных исследований была разработана технология очистки высококонцентрированных жирсодержащих сточных вод молокоперерабатывающих предприятий, способная обеспечить качество очищенных сточных вод удовлетворяющее требованиям сброса в систему городской канализации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rittmann Bruce E., McCarty Perry L., 2001. Environmental Biotechnology: Principles and Applications. New York: Higher Education. - 307 – 362.
2. Амелина Ж., Варваров В., Саликова М., 2005. Экология: Учебное пособие. – Воронеж: ВГТА. – 232.
3. Валкина Е, Вернези С, Николаенко И, Богущкий П., 2010. Использование методов водоочистки в новейших энергосберегающих технологиях. – MOTROL. – Motoryzacja i energetyka zolnictwa. – Lublin. – Volume 12C. – 114-120.
4. Васильев Б., Мишуков Б., Иваненко И., 2001. Технологии биологического удаления азота и фосфора на станциях аэрации: Водоснабжение и санитарная техника. – Москва. – № 5. – 22–25.
5. Гвоздяк П., 2006. Спужання активного мулу: хто винен і що робити: Вода і водоочисні технології. - Київ. - № 3. - 38-44.

6. Горбань Н., Мащок С., Ревякина Н., Топчий Р., 2001. Современные методы очистки сточных вод предприятий пищевой промышленности: Проблемы охраны навколишнього природного середовища та техногенної безпеки. – Харьков. – 177 – 181.
7. Горбань Н., Мащок С., 2006. Технология очистки сточных вод молокозаводов: «Материалы 4-й международной конференции» 31 января – 1 февраля 2006 г. – Харьков. – 336.
8. Горбань Н., Школьник Е., 1995. Использование иммобилизованных микроорганизмов для повышения эффективности очистки сточных вод: Химия и технология воды. – Киев. - №4. – 444-448.
9. Демидов О., 1990. Обзорный доклад о мировом уровне и тенденциях развития строительной науки и техники, тема: очистные сооружения предприятий мясной и молочной промышленности. – Москва. – 70.
10. Дмитрієва О., Калашніков В., Колдоба І., 2006. Водовідведення в населених пунктах України та напрямки його удосконалення: Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. - Київ. – №6. – 47-51.
11. Залашко М., 1990. Биотехнология переработки молочной сыворотки: Агропромиздат. – Москва. – 192.
12. Имхофф К., Имхофф К., 1997. Справочник по городским сточным водам: Пер. с нем. Харьков. – 537.
13. Карелин Я., Яромский В., 1993 Очистка сточных вод предприятий молочной промышленности. Водоснабжение и санитарная техника. – Москва. – № 6. – 6 – 7.
14. Каца В. 1972. Вода и сточные воды в пищевой промышленности. Пищевая промышленность. – Москва. – 269 – 289.
15. Корчик Н., 2007. Технологии очистки сточных вод предприятий пищевой промышленности: Материалы IV междунар. конф. «Сотрудничество для решения проблемы отходов». – Харьков. – 251–254.
16. Мальований М., Дячок В., Сахневич Я., 2008. Аналіз перспектив очищення стоків харчових виробництв. Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. – Київ. – №5. – 72 – 75.
17. Медведев Г., Мишуков Б., Соловьева Е., 2009. Влияние усреднения расхода и состава сточных вод на работу азротенков-нитрификаторов: Водоснабжение и санитарная техника. – Москва. – № 6. – 65 – 68.
18. Мешенгиссер Ю., Щетинин А., Есин М., 2007. Удаление азота и фосфора активным илом: Коммунальное хозяйство городов. - ХНАГХ. – Харьков. – №74. – 36–45.
19. Николаев А., Крючихин Е., 2003. Очистка сточных вод до требований экологических нормативов на сброс в водоемы: Экология и промышленность России. – Москва – 17–19.
20. Трунов П., Лунин С., Благодарная Г., Шевченко А. 2010. Технология обработки высококонцентрированных сточных вод молокоперерабатывающих предприятий. Науковий вісник будівництва. – Харьков. – ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – № 60. – 22-27.
21. Хенце М., Армозс П., 2004. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы: пер. с англ. – Мир. – 471.
22. Чеботаева М., 2008. Очистные сооружения Biomag в индустрии напитков в России. Пиво и напитки. – Москва. – №4. – 44–45.
23. Шифрин С., Иванов Г., Мишуков Б., Фефанов Ю., 1981. Очистка сточных вод предприятий мясной и молочной промышленности: Легкая и пищевая промышленность. – Москва. – 272.
24. Шифрин С., Мишуков Б., 1968. Очистка сточных вод предприятий молочной промышленности: Пищевая промышленность. - Москва. - 117.
25. Шифрин С., Соломахин И., 1964. Очистка сточных вод мясокомбинатов. Водоснабжение и санитарная техника. - Москва. - №4. - 18-21.
26. Шустер К., Нойберт И. 2009. Анаэробная обработка высококонцентрированных стоков молочных предприятий. Экология производства. – Москва. – №11. – 50–52.
27. Эпоян С.М., Горбань Н.С., Фомин С.С., 2010. Анализ существующих методов очистки сточных вод молокозаводов: Науковий вісник будівництва. - ХДТУБА, ХОТВ АБУ, Харьков. – Вип. 57. – 393 – 398.
28. Эпоян С., Фомин С., Горбань Н., Аскретков Н., Ревякина Н., 2008. Технологія очистки стічних вод, що скидаються у водні об'єкти від сполук азоту: Науковий вісник будівництва.- ХДТУБА, ХОТВ АБУ, Харьков.- Вип. 50.- 205-210.

INTENSIFICATION OF BIOLOGICAL TREATMENT SEWAGE DAIRIES

Summary. The article analyzes the problem of sewage treatment, milk. The basic methods of wastewater treatment industry and determine their effectiveness. Describes the laboratory setup simulating system aeropack with free-activated sludge and immobilized on a support material. The efficiency of purification of model solutions with a composition close to that of real dairy wastewater in laboratory settings.

Key words: wastewater, dairies, purification, activated sludge, a carrier material, chemical oxygen demand.

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЦЕССАХ ВОДОПОДГОТОВКИ НА ТЭС

Ирина Чуб, Тамара Айрапетян

Харьковский национальный университет городского хозяйства
имени А.Н. Бекетова

Адрес: Украина, г. Харьков ул. Революции-12
E-mail: iraclub@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, позволяющие повысить эффективность работы водоподготовительных установок.

Ключевые слова: энергосберегающие технологии, водоподготовка, натрий-катионитовый фильтр, умягчение, замкнутый оборотный цикл, период фильтроцикла, рабочая емкость, рабочие параметры, рабочая зона.

ВВЕДЕНИЕ

Системы водоподготовки и водоочистки являются важнейшей составляющей оборудования энергетических предприятий. Именно от качества исходной воды напрямую зависит надежность и эффективность работы всего энергетического комплекса. Основная задача водоподготовки в энергетике – это обессоливание воды, поскольку именно соединения кальция и магния в несколько раз способны сокращать срок службы нагревательных элементов энергетических предприятий.

Оборудование для водоподготовки в энергетическом комплексе используется для улавливания коллоидных и грубодисперсных примесей, а также солеобразующих элементов.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Крупными источниками образования высокоминерализованных сточных вод являются установки химической подготовки воды для производства пара на тепловых, электрических и атомных станциях. Применяются одно и двухступенчатое умягчение воды с использованием метода натрий - катионирования. Двухступенчатое натрий - катионирование применяют для более глубокого умягчения воды, а также с целью экономии соли и увеличения длительности фильтроцикла. В этом случае в фильтрах первой ступени вода умягчается до жесткости 0,1 - 0,05 мг-экв/л при средней скорости фильтрования 15-20 м/ч, а в фильтрах второй ступени жесткость предварительно умягченной воды снижается до 0,03-0,01 мг-экв/л [1-5]. Главной проблемой при эксплуатации этих установок являются зафиксированные рабочие параметры (скорость, рабочая емкость, количество соли и воды для собственных нужд), которые определяются при проектировании этих установок [6, 8, 11]. Как показывает практика, требуемое количество

умягченной воды непостоянно, а работа фильтров при постоянных рабочих параметрах приводит к не эффективному использованию катионита и избыточному сбросу солей в окружающую среду. При регенерации натрий-катионитовых фильтров образуются сточные воды, содержащие в основном соли постоянной жесткости в виде CaCl_2 , MgCl_2 , а также раствор поваренной соли (NaCl). Кроме того, в этих водах содержится ряд других солей в значительно меньшей концентрации [4-5].

Следовательно, для сокращения расхода воды и реагентов на собственные нужды натрий-катионитовых фильтров и повышения экономичности их работы, необходимо в процессе эксплуатации изменять рабочие параметры и создать замкнутые циркуляционные контуры регенерации натрий-катионитовых фильтров.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Повысить эффективность работы водоподготовительных установок можно за счет усовершенствования действующих технологических схем подготовки воды и повторного использования стоков в цикле водоподготовки, а также использования надежных методов расчета, которые позволили бы с достаточной точностью определять рабочие характеристики катионитовых фильтров в изменившихся условиях.

Натрий-катионитовые аппараты на собственные нужды потребляют до 20% от объема обработанной воды и до 40 тыс. т соли за год [8, 11]. Постоянная работа фильтров в максимальном режиме приводит к частым регенерациям, короткому фильтроциклу, и неполному использованию емкости загруженного катионита. В результате чего эффективность работы натрий-катионитовых фильтров снижается.

Анализ литературных источников показал, что разработанные в настоящее время для промышленного внедрения методы обработки сточных вод натрий-катионитовых фильтров

характеризуются сложностью, дороговизной и часто требуют применения нестандартного оборудования [13, 20, 21]. А существующие методы расчета катионитовых фильтров не могут применяться для определения рациональных рабочих параметров фильтров в процессе их эксплуатации так как не соответствуют предъявляемым требованиям [7, 9, 12, 14, 17]. Вопросы, связанные с эксплуатацией натрий-катионитовых фильтров, и в частности, методы определения эффективных рабочих параметров, на сегодня освещены недостаточно.

Сокращение количества солевых сбросов может быть достигнуто в результате совершенствования технологии обработки сточных вод, образующихся при промывке (регенерации) натрий-катионитовых фильтров.

При проведении экспериментальных исследований была изучена работа натрий-катионитового фильтра (изменение скорости фильтрования) и технология применения содо-известкового метода удаления солей постоянной жесткости при сохранении неизменной концентрации хлорида натрия.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

С целью исключения сброса в канализацию засоленных сточных вод и разработки технологии использования регенерационных растворов в замкнутом цикле была детально исследована динамика отмывки катионитов по таким показателям как концентрация хлоридов и величина общей жесткости отмывочной воды. При этом

представляет определенный научный и практический интерес исследование баланса хлоридов, поступающих на фильтры и отводимых от них в процессе регенерации и отмывки.

На рис. 1 представлена динамика изменения концентрации хлоридов и жесткости воды в процессе промывки (регенерации) натрий-катионитовых фильтров первой степени. В процессе исследований установлено, что концентрация хлоридов возрастает со временем отмывки, достигая максимума на 8-12 минут, потом концентрация хлоридов постепенно снижается.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что максимальное количество NaCl выводится из фильтра в первые 20 минут (95-97%), в последующие 10-20 минут до завершения отмывки из фильтра выводятся лишь 5-3% NaCl. Средняя концентрация хлоридов в отмывочной воде за первые 20 минут (соли горечи) колеблется в пределах от 50 до 70 г/л, в последующие 10-20 минут - 0,8-1,2 г/л.

Исследования метода обработки (умягчения) сточных вод от регенерации натрий-катионитовых фильтров для повторного (многократного) использования проводили на искусственно приготовленной воде, которая соответствует составу сточных вод, отобранных в процессе регенерации натрий-катионитовых фильтров.

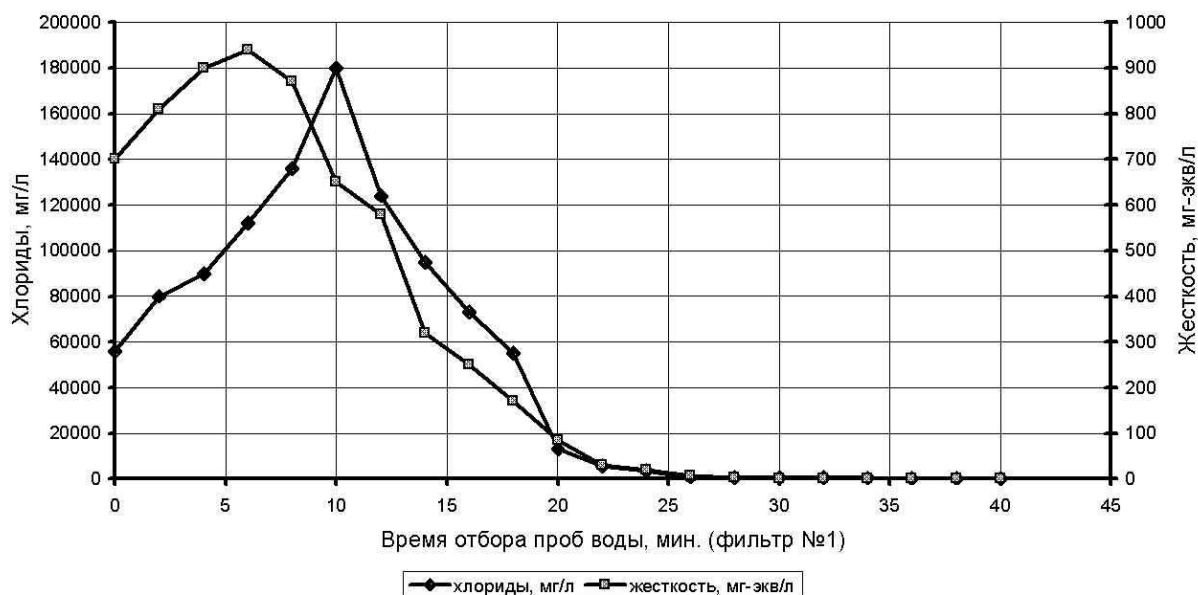


Рис. 1. Динамика изменения концентрации хлоридов и жесткости воды в процессе отмывки (регенерации) натрий-катионитовых фильтров 1-й степени

Fig 1. Dynamics of changes in the concentration of chloride and water hardness in the process of cleaning (regeneration) Na-cation filters of the 1st stage

Таблица 1. Результаты умягчения модельных растворов, имитирующих состав сточных вод от регенерации Na-катионитовых фильтров 1-й степени содо-известковым методом

Table 1. Results of softening model solutions simulating the composition of waste water from the recovery of Na-cation filters 1st stage soda-lime method

№ п/п	Химический состав модельных растворов сточных вод		Доза реагентов, г/л		Химический состав умягченной воды		
	Ингредиенты, ед.измерения	Концентрация	Известь	Кальцин. сода	СГ, г/л	Ж _{заг.} , мг-экв/л	Ca ²⁺ , мг-экв/л
1	СГ, г/л Ж _{общ.} , мг-экв/л Ca ²⁺ , мг-экв/л Mg ²⁺ , мг-экв/л	56,0 700,0 485,0 215,0	15,08	44,95	56,0	4,1	2,5
2	СГ, г/л Ж _{общ.} , мг-экв/л Ca ²⁺ , мг-экв/л Mg ²⁺ , мг-экв/л	90,0 900,0 627,0 273,0	17,92	58,84	90,0	4,7	3,1
3	СГ, г/л Ж _{общ.} , мг-экв/л Ca ²⁺ , мг-экв/л Mg ²⁺ , мг-экв/л	180,0 652,0 458,0 194,0	13,53	43,09	180,0	3,9	2,3
4	СГ, г/л Ж _{общ.} , мг-экв/л Ca ²⁺ , мг-экв/л Mg ²⁺ , мг-экв/л	136,0 870,0 609,0 261,0	18,08	56,58	136,0	4,6	3,2

Необходимые величины жесткости (концентрации ионов кальция и магния) и хлоридов в воде получали путем введения растворов хлоридов кальция, магния и дополнительного количества хлористого натрия, чтобы довести хлориды до необходимых концентраций. При этом жесткость воды, подлежащей обработке, колеблется в пределах от 40,0 до 950 мг-экв/л, концентрация хлоридов – 6,5-190 г/л, общее солесодержание 1500-4500 мг/л.

Процесс обработки (умягчения) указанных сточных вод (модельных растворов) осуществляли содо-известковым методом. Дозы соды и известки для обработки воды определяли в соответствии со стехиометрическими концентрациями ионов кальция и магния. Эффективность процесса умягчения сточных вод определяли путем анализа обработанных вод на содержание концентраций кальция, магния, величину общей щелочности, а также концентрацию хлоридов.

В табл. 1 представлены результаты экспериментальных исследований процесса умягчения указанных сточных вод содо-известковым методом.

Существенный интерес представляют также исследования по умягчению усредненных проб сточных вод. При этом установлено, что

величина общей жесткости умягченной воды находится в пределах 2,0-2,5 мг-экв/л. Следует отметить, что для разработки технологии умягчения рассматриваемых сточных вод необходимо учитывать данные умягчения как разовых, так и усредненных проб сточных вод.

Кроме того, проведены исследования процесса умягчения содо-известковым методом реальных сточных вод, отобранных при регенерации натрий-катионитовых фильтров, которые эксплуатируются на ЗАТ "Теплоэлектроцентральный-3" г. Харькова. Кинетику процесса осаждения указанных вод изучали в усредненных пробах, отобранных за первые 10 минут и за первые 20 минут отмывки натрий-катионитовых фильтров.

На основании результатов экспериментов установлено, что величина концентрации ионов кальция в умягченной воде находится в пределах 1,1-3,2 мг-экв/л, концентрация ионов магния колеблется от 0,7 до 1,6 мг-экв/л. Такой глубины умягчения (обработки) содо-известковым методом достаточно, т.е. она удовлетворяет требованиям, которые предъявляются к регенерационным растворам. Это дает возможность использовать сточные воды от регенерации натрий-катионитовых фильтров в замкнутом цикле регенерации в соответствии со схемой (рис. 2).

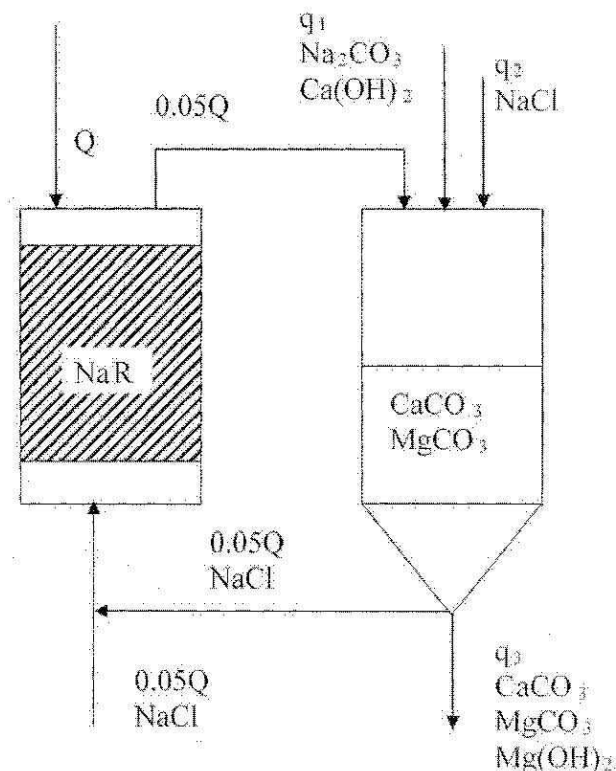


Рис. 2. Рекомендуемая схема регенерации натрий - катионитовых фильтров
 Fig.2. The recommended regimen for the regeneration of sodium - cation filters

Q - начальный регенерационный расход; q_1 - расход содового реагента; q_2 - расход подпиточной воды на пополнение системы регенерации; q_3 - расход шлама из системы; C_1 - концентрация хлоридов в регенерате; C_2 - концентрация хлоридов в растворе содового реагента; C_3 - концентрация хлоридов в растворе поваренной соли на пополнение системы регенерации; C_4 - концентрация хлоридов в растворе, направляемом на повторную регенерацию; C_5 - концентрация хлоридов в растворе для пополнения регенерата; $0,05Q \text{ NaCl}$ - начальный регенерационный раствор;

$0,05Q$ - расход засоленного раствора (регенерата). Имеет химический состав, состоящий из соединений CaCl_2 , MgCl_2 , NaCl ;

$q_1 \text{ Na}_2\text{CO}_3, \text{Ca(OH)}_2$ - расход реагента для осаждения солей жесткости и удаления чистого раствора технической соды с минимальным содержанием примесей других солей;

$q_2 \text{ NaCl}$ - подпитка системы, солесодержание которой определяется экспериментально;

$0,05Q \text{ NaCl}$ - расход регенерационного раствора, возвращаемого в систему;

$q_3 \text{ CaCO}_3, \text{MgCO}_3$ - расход из системы шлама, образующегося в результате химических реакций.

Шлам возникает вследствие реакции взаимодействия солей регенерата и реагента (технической соды):



Образующийся малорастворимый осадок карбонатов кальция и магния выводится со шламовой водой и может найти применение в виде прочного строительного материала. Это является еще одним преимуществом предлагаемого метода, как нововведение в проблему обработки вторичного загрязнения, которым является регенерат натрий-катионитовых фильтров.

Создание замкнутого контура регенерации натрий - катионитовых фильтров позволит исключить сброс засоленных сточных вод в водные объекты, а также добиться экономии поваренной соли, используемой для регенерации.

Также одним из путей повышения эффективности работы натрий-катионитовых фильтров водоподготовительных установок (ВПУ) и сокращения энергозатрат является определение рациональных рабочих параметров в процессе их эксплуатации.

Для выявления факторов влияющих на работу катионитового фильтра были проведены лабораторные исследования. Исследования проводили на экспериментальной установке. Скорость фильтрования воды при выполнении исследований не превышала 10 м/ч. Катионит (КУ-2-8, $d_s=0,8$ мм) загружали в колонну высотой 50 см в набухшем состоянии, объемом 800 см³ (диаметр установки – 5 см, высота загрузки – 40 см.). Для перевода его в рабочую Na⁺- форму пропускали 2,5 л 10% - ного раствора NaCl. Затем отмывали от соли дистиллированной водой [18].

Через подготовленный и отмытый катионит пропускали водопроводную воду г. Харькова с содержанием 700 мг/л и с общей жесткостью 6,5–7 мг-экв/л. Допустимая концентрация общей жесткости в фильтрате 0,1 мг-экв/л. В ходе эксперимента устанавливали время наступления проскока τ_{np} , и время окончания процесса фильтрования τ_k , которое соответствует

появлению в фильтрате исходной концентрации воды. Результаты приведены в таблице 2.

Объем воды (Δw) эквивалентен неиспользованной емкости катионита. Количество неиспользованного катионита в фильтре при изменении скорости фильтрования объясняется разной высотой рабочей зоны, которая определяется по соотношению [6,11]:

$$h_{p.z.} = 4 \cdot 10^{-2} v_k \cdot d_k^2 \cdot 2.3 \lg C_0, \quad (3)$$

и зависит от исходной концентрации катионов жесткости в умягчаемой воде. Концентрация влияет на форму концентрационного фронта, образующегося внутри рабочей зоны фильтра. Форма фронта позволяет определить количество катионита, который не участвует в обмене в момент наступления проскока. Для получения концентрационной кривой были проведены исследования на колонке с пробоотборниками, которые позволяли определять концентрацию катионов жесткости внутри колонки при наступлении проскока. Результаты исследований приведены на рис. 3.

Таблица 2. Результаты экспериментальных исследований
Table 2. Results of experimental studies

Скорость, м/ч	Время τ_{np} и τ_k , ч (определение объема воды, Δw , м ³)			
	τ_{np}	τ_k	$\Delta\tau$	Δw
3	6,43	9,2	2,77	0,017
5	3,18	5,6	2,42	0,024
7	1,8	4,1	2,3	0,032

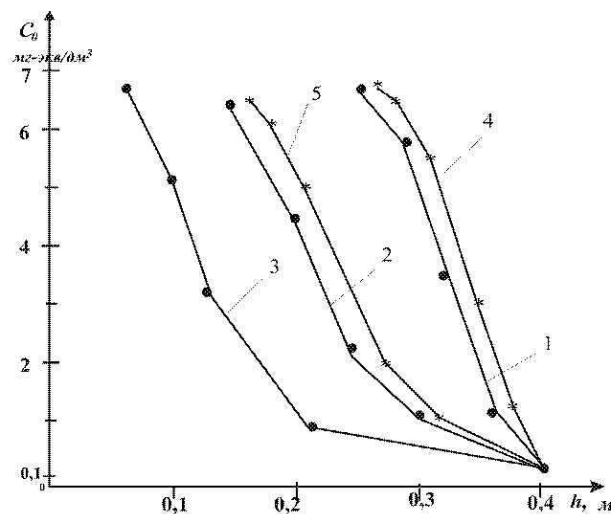


Рис. 3. Концентрационные кривые:
Fig.3. Concentration curves

1,2,3 – экспериментальные (скорость: 3, 5, 7 м/ч);
4, 5 – расчетные при скорости – 3 и 5 м/ч для $C_0=7$ мг-экв/л.

После изучения факторов влияющих на степень использования загруженного катионита во время фильтрования, были получены соотношения, которые учитывают особенности насыщения катионита в рабочей зоне фильтра и позволяют точно определять степень использования емкости загруженного катионита в зависимости от различных условий.

Согласно предложенного метода расчета, необходимо определить неиспользованную емкость загруженного катионита. Для расчета рабочую зону этого фильтра делят на несколько слоев, общим количеством m . С помощью разработанной математической модели определяют концентрации катионов в воде и катионите каждого слоя:

$$\bar{c}_{j\text{дин}} = \alpha \cdot f(c_j); \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (4)$$

$$u(\bar{c}_{j\text{дин}} - \bar{c}_{j+1\text{дин}}) - v(c_{j-1} - c_j) = 0,$$

$$j = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

где u и v - скорости сорбционного фронта и воды м/с; $\bar{c}_{j\text{дин}}$, $c_{j\text{дин}}$ - концентрации в катионите и воде на j слое, мг-экв/л, мг-экв/л; $\alpha \leq 1$ - коэффициент, который учитывает неравновесные условия. m - количество слоев, на которые разбита рабочая зона фильтра.

Граничными условиями для уравнений (4) и (5) являются условия только для стадии параллельного переноса:

$$\begin{aligned} z \rightarrow +\infty & \quad C \rightarrow 0 & \quad \bar{C} \rightarrow 0, \\ z \rightarrow -\infty & \quad C \rightarrow C_0 & \quad \bar{C} \rightarrow f(C_0), \end{aligned}$$

где z - ширина концентрационного фронта.

После преобразования системы уравнений (4) и (5) было получено конечную формулу:

$$\frac{u}{v} [f(c_j) - f(c_{j+1})] - c_{j-1} + c_j = 0 \quad (6)$$

$$j = 1, 2, \dots, m.$$

Уравнение (6) решается методом Ньютона. В результате его решения получают значения концентраций катионов жесткости в катионите для каждого слоя рабочей зоны. Далее определяют неиспользованную емкость катионита Δe . Для ее расчета предложено формулу [22 - 23].

$$\bar{C}_0 \cdot V_{p,z} - \sum_{j=1}^m \bar{C}_{j\text{дин}} \cdot \Delta V_j = \Delta e, \text{ мг-экв}, \quad (7)$$

где ΔV_j - объем катионита на j - слое; \bar{C}_0 - емкость катионита с учетом условий регенерации, мг-экв/л.

На основании предложенного способа определения неиспользованной емкости (7), и выполненных теоретических и экспериментальных исследований предложено зависимости (8), (9) для определения времени работы фильтра до проскока и рабочей емкости катионита:

$$\begin{aligned} \tau_{np} &= \frac{1}{u \cdot f} \cdot (V_k - V_{n,z}) = \frac{\bar{C}_0}{C_0 \cdot v \cdot f} \cdot (V_k - V_{n,z}) = \\ &= \frac{\bar{C}_0}{C_0 \cdot v} h_k \cdot \left(1 - \frac{V_{n,z}}{V_k}\right), \text{ ч}. \end{aligned} \quad (8)$$

$$e_p = \frac{\bar{C}_0 \cdot (V_k - V_{n,z})}{h \cdot f} = \bar{C}_0 \cdot \left(1 - \frac{V_{n,z}}{V_k}\right), \text{ Г-ЭКВ/М}^3, \quad (9)$$

где V_k - объем катионита в фильтре, м³; $V_{n,z}$ - объем неиспользованного катионита в фильтре, который определяется на основании Δe , м³.

Так как период работы фильтра τ_{np} является важной технологической характеристикой, то полученное выражение (8) сравнивали с другими известными формулами для определения рабочего периода фильтра, которыми пользуются в водоподготовке. Для сравнения было выбрано уравнение Громогласова [6], как наиболее распространенное, а также другие формулы [8, 11]. Расчет выполняли для следующих условий: фильтр диаметром 3,4 м, загрузка катионит КУ-2-8; высота загрузки - 1,6 м; диаметр зерна катионита, $d_z = 0,8$ мм. Производительность фильтра 137 м³/ч, соответственно скорость фильтрования $v = 15$ м/ч. Исходная концентрация катионов жесткости в воде $C_0 = 7$ г-экв/м³. Концентрация в фильтрате $C_{np} = 0,1$ г-экв/м³, обменная емкость катионита КУ -2-8 в процессе эксплуатации (по известной полной обменной емкости $E_n = 1500$) $E_p^{Na} = \bar{C}_0 = 1048$ г-экв/м³.

По формуле Громогласова [6]:

$$\tau = \frac{h_{cn}}{v \cdot \beta} - \frac{-\ln \varphi - 1}{0,92 \cdot v^{0,5} \cdot d_z^{-1,5} \cdot \beta^{0,5}}, \quad (9)$$

где τ - время фильтрования до заданного значения проскока, ч; v - скорость фильтрования, м/ч; d_z - диаметр зерна катионита, мм; h_{cn} - высота слоя катионита, м; $\varphi = C_\phi / C_0$; $\beta = C_0 / q_0$; C_0 и C_ϕ - концентрации ионов соответственно исходная и в фильтрате; q_0 - концентрация ионов, сорбированных единицей объема катионита, был получен такой результат:

$$\tau_{np} = \frac{1,6 \cdot 1048}{15 \cdot 7} - \frac{-\ln \frac{0,1}{7} - 1}{0,92 \cdot 15^{0,5} \cdot 0,8^{-1,5} \cdot 0,007^{0,5}} = 8,1 \text{ ч}.$$

По предложенной зависимости (8):

$$\tau_{np} = \frac{\bar{C}_0 \cdot (V_k - V_{n.s.})}{(C_0 - C_{np}) \cdot f \cdot v} = \frac{1048 \cdot (14,56 - 4,12)}{(7 - 0,1) \cdot 9,1 \cdot 15} = 11,5$$

И по двум другим предложенным для сравнения зависимостям [8,11]:

$$\tau_{np} = \frac{E_{pab} \cdot h_k}{v \cdot C_0} = \frac{0,02 \cdot E_{pab} \cdot d_s^2 \ln C_0}{C_0}, \quad (10)$$

$$\tau_{np} = \frac{1048 \cdot 1,6}{15 \cdot 7} = \frac{0,02 \cdot 1048 \cdot 0,8^2 \ln 7}{7} = 12,32,$$

$$\tau = \frac{e_p \cdot h_k}{v \cdot \mathcal{K}_{u.s.}} = \frac{1048 \cdot 1,6}{15 \cdot 7} = 15,9, \quad (11)$$

Полученные по четырем уравнениям значения τ_{np} были проанализированы.

Установлено, что на расхождение результатов влияет второй элемент правой части уравнений (9) и (10). В уравнении (9), практически не учитывается катионит в рабочей зоне фильтра. Это объясняет полученный результат, т.е. самый короткий период работы фильтра – 8,1 ч. Авторы уравнения (10) для упрощения предлагают условно считать использованной только половину катионита в рабочей зоне (коэффициент 0,02=0,5·0,04).

Формула (11) широко используется для практических расчетов. Однако результаты, полученные по ней, а именно: время работы фильтра до проскока, являются самыми не точными и требуют корректировки в процессе эксплуатации.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что разработанный метод определения времени работы фильтра наиболее полно отображает процесс насыщения (отработки) ионита в рабочей зоне, который зависит от формы образующегося концентрационного фронта, исходной концентрации воды, неравновесных условий и скорости фильтрования. Следовательно, применение формулы (8) для определения рабочего периода фильтра в процессе его эксплуатации позволяет получить самые адекватные результаты. На основе предложенного метода расчета была разработана компьютерная программа для автоматического выполнения необходимых расчетов и построения выходной кривой на экране компьютера, а также показа всех основных параметров фильтра [22].

ВЫВОДЫ

Как показали проведенные исследования, обработка сточных вод позволяет снизить общую жесткость до 0,6 - 4,0 мг -экв/л, концентрацию кальция – 0,375 - 2,7 мг-экв/л, магния - 0,225 - 1,3 мг-экв/л. Это дает возможность использовать умягченную воду для регенерации натрий - катионитовых фильтров.

В результате проведенных исследований разработаны метод расчета натрий – катионитового фильтра для определения рациональных технологических параметров и технические решения по переводу системы регенерации Натрий-катионитовых фильтров на замкнутый режим работы, позволяющий исключить сброс засоленных сточных вод и получить значительную экономию реагентов (поваренной соли).

Регулирование технологических рабочих параметров в процессе эксплуатации дает экономию расхода воды и реагентов на собственные нужды водоподготовки в среднем на 10 – 15%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айрапетян Т. С. 2008 Умягчение промывных (регенерационных) сточных вод натрий-катионитовых фильтров // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ.– Вип.46.- 154-157.
2. Айрапетян Т.С., Пантелят Г.С. 2005 Рекомендуемая схема замкнутого цикла регенерации натрий-катионитовых фильтров предприятий теплоэнергетики // 36. допов. Міжнар. конгр. "Екологія, технологія, економіка, водопостачання, каналізація" (ЕТЕВК-2005). – Крим, м. Ялта.- 390-394.
3. Айрапетян Т.С., Пантелят Г.С., Сыроватский АА, Карагур АС. 2005 Использование промывных (регенерационных) сточных вод натрий-катионитовых фильтров в замкнутом циркуляционном контуре // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – Вип. 33.- 179-182.
4. Беспалов В. И. 2010 Природоохранные технологии на ТЭС: учебное пособие / В. И. Беспалова, С. У. Беспалова, М. А. Вагнер; Томский политехнический университет.– 2-е изд.– Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 240.
5. Валкина Е., Вернези С., Николенко И., Богущий П. 2010 Использование методов водоочистки в новейших энергосберегающих технологиях // Motrol. Motoryzacja I energetyka rolnictwa. – Simferopol – Lublin – Vol. 12 С. – 114-120.
6. Громогласов А.А. 1990 Водоподготовка: Процессы и аппараты: Учеб. пособие для вузов/ А.А.Громогласов, А.С.Копылов, А.П.Пильщиков; Под ред. О.И. Мартыновой. – М.: Энергоатомиздат. – 272.
7. Долгоносов А.М., Сенявин М.М., Волощик И.Н. 1993 Ионный обмен и ионная хроматография.- М., «Наука». – 222.
8. Кишневський В.А. 1999 Сучасні методи обробки води в енергетиці: Навчальний посібник для студентів спеціальностей «Теплоенергетика»,

«Атомна енергетика» та експлуатаційного персоналу ТЕС и АЕС. – Одесса: ОГПУ.–196.

9. Комарова И.В., Галкина Н.К. и др. 1998 Комплекс программ расчета процесса химводоочистки на основе математической модели / Наука производству. 2 (4). 61-63.

10. Кульский Л. А., Строкач П. П. 1986 Технология очистки природных вод. – 2-е изд., перераб. и доп.-К.: Вища шк. – 352.

11. Копылов А.С. 2003 Водоподготовка в энергетике./ Копылов А.С., Лавыгин В.М., Очков В.Ф.– М.: Изд-во МЭИ. – 309 [11].

12. Мартынова О.И., Никитин А.В., Очков В.Ф. 1990 Водоподготовка: Расчеты на персональном компьютере. М.: Энергоатомиздат. – 215.

13. Никитин К.В., Старостина К.В., Талтыкин С.Е. 1996 Малоотходная технология ионообменного умягчения воды в аппаратах с подвижным слоем катионита и утилизацией регенерирующего раствора // Химия и технология воды. – т.18, № 4. - 120-123.

14. Очков В.Ф. 1999 Решение инженерно-технических задач в среде Mathcad. Теплоэнергетика и теплотехника. Т.1. М.: Издательство МЭИ, – 528.

15. Пантелят Г. С., Эпоян Т. С. 2002 Использование сточных вод от регенерации натрий-катионитовых фильтров предприятий теплоэнергетики // Сб. матер. Пятого междунар. конгр. «Вода: экология и технология» (ЭКВАТЭК-2002). – М.: – 409–410.

16. Пантелят Г. С., Колотило А. Н., Сыроватский А. А. 2001 Разработка системы водоснабжения передельного металлургического завода // Водоснабжение и санитарная техника. – № 5.– 15–17.

17. Перлов А.В., Легенченко И.А., 1990 Метод технологического расчета ионитового фильтра/ Химия и технология воды, т. 12. №4.-. 368-374

18. Практикум по ионному обмену / В.Ф.Селеменев, Г.В.Славинская, В.И.Горшков, В.Ю.Хохлов // Воронеж, ВГУ– 2004. 159.

19. Теоретические основы очистки воды / Куликов Н. И., Найманов А. Я., Омельченко Н. П., Чернышев В. Н., Маслак В. Н., Зотов Н. И.– Макеевка.: ДГАСА, 1999. – 277.

20. Хамизов Р.Х., Новицкий Э.Г., Миронова Л.И., Фокина О.В., Жигулева Т.И., Крачак А.Н. 1996 Переработка природных и техногенных вод с использованием модифицированных цеолитов // Техника машиностр.. № 4, 112–118.

21. Хожайнов Ю. М. 1995 Комплексные технологические схемы для опреснения и концентрирования промышленных и природных вод электродиализом // Хим. пром.. № 9, 518–523.

22. Чуб И.Н. 2008 Повышение эффективности работы Na-катионитовых установок на основе разработанного АРМа/ И.Н.Чуб // Науковий вісник будівництва.– Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ – Вип. 46. – 208– 212.

23. Чуб И. Н. 2006 Расчет сорбционных фильтров с неподвижным слоем для процессов водоподготовки/ И.Н.Чуб // Сборник тезисов докладов участников I Всеукраинской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Киев. – 134.

24. Эпоян Т. С. 2002 Замкнутый цикл регенерации натрий-катионитовых фильтров предприятий теплоэнергетики // Коммунальное хозяйство городов.- Науч. техн. сб. – ХГАГХ. – К.: Техніка. – Вып. 36.– 294-297.

RESOURCE TECHNOLOGIES IN THE WATER TREATMENT PROCESS FOR HPP

Summary. There results of theoretical and experimental researches that allow to increase the work efficiency of water treatment plants are presented in the article.

Key words: energy saving technology, water treatment plants, sodium-cation filters, water softening, reverse cycle closed, time filter cycle, worker capacity, technological parameters, worker zone.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТНО-ЛИВНЕВЫХ СТОЧНЫХ ВОД

Степан Эпоян, Сергей Лукашенко, Наталия Гетманец

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры
Адрес: Украина, г. Харьков, ул. Сумская, 40
E-mail: nanas85@mail.ru

Аннотация: В работе представлены современные методы очистки поверхностно-ливневых сточных вод. Рассмотрены некоторые направления усовершенствования очистки поверхностно-ливневых сточных вод от взвешенных веществ и нефтепродуктов. Показаны структура и физико-химические свойства пенополиуретанов. Приведены результаты исследований по очистке нефтесодержащих сточных вод с применением фильтра с пенополиуретановой загрузкой. Определены основные параметры работы фильтра.

Ключевые слова: поверхностно-ливневой сток, пенополиуретан, нефтепродукты, взвешенные вещества, фильтрование, очистка, фильтр, эффект очистки

ВВЕДЕНИЕ

Атмосферные осадки, выпадающие над городами, являются естественным средством оздоровления городского воздушного бассейна и санитарной уборки территории. Частицы пыли, не осевшие аэрозоли, выхлопные газы и прочие загрязнения, содержащиеся в атмосферном воздухе, увлекаются дождевыми каплями или хлопьями снега, а затем смываются в канализационную сеть вместе с загрязнениями, накапливающимися на поверхности крыш, тротуаров, городских проездов. Естественно, атмосферные воды значительно загрязняются при прохождении приземных слоев атмосферы и особенно в процессе стока по поверхности городских водосборов. Степень загрязнения стока различна. Содержание в нем загрязняющих веществ зависит от их концентрации в атмосферном воздухе и на открытых городских поверхностях к моменту выпадения осадков [4, 9, 11].

Поверхностные сточные воды с территории городов загрязнены различными органическими и неорганическими веществами в растворенном, эмульгированном и нерастворимом состоянии. В зависимости от условий формирования этих стоков концентрация взвешенных веществ в них колеблется в пределах 300-4000 мг/л, нефтепродуктов – 5-45 мг/л, БПК_{полн} – 80-120, ионов тяжелых металлов – 0,1-10 мг/л [1, 8, 17, 25].

Дождевые и талые воды, стекающие с застроенных территорий, до недавнего времени считались не представляющими серьезной опасности для водоемов. Отвод их представлялся необходимым лишь по соображениям благоустройства территории.

В настоящее время установлено, что дождевые и талые воды, стекающие с территорий городов и площадок промышленных предприятий, значительно загрязнены и не могут сбрасываться в водоемы без ограничений [4, 9, 14, 21, 22]. Поэтому организованный отвод с последующим

обезвреживанием дождевых и талых вод в настоящее время является не только инженерной, но и санитарной необходимостью.

В отличие от хозяйственно-бытовых сточных вод, которые характеризуются сравнительно небольшими колебаниями расходов по сезонам года и часам суток, и от производственных сточных вод, которые в большинстве случаев не колеблются по сезонам года, а изменяются по часам суток в зависимости от сменности работы предприятия, дождевые сточные воды резко отличаются по расходу. Расходы эти эпизодичны и в основном наблюдаются на территории Украины лишь в течение шести – восьми месяцев в году. На территории Украины в течение короткого периода времени, исчисляемого минутами, расходы дождевых вод могут достигать 50 - 100 л/(с·га), а в течение года 1200 – 2500 м³/га. Суммарная продолжительность стокообразующих дождей за год обычно не превышает 250 ч. [8, 13].

Следовательно поверхностный сток воздействует на водные объекты периодически, причем интенсивность воздействия резко колеблется. Подавляющее количество жидких осадков выпадает в виде дождей малой интенсивности и расходы талого стока, как правило, также невелики. Следовательно, большая часть накапливающихся на территории водосборного бассейна загрязнений выносится в водоемы с небольшими расходами воды. Кроме того, при определении пропускной способности очистных сооружений ориентация на максимальные расходы ливневого стока редкой повторяемости, на прием и отведение которого рассчитывается сеть дождевой канализации, нецелесообразна, так как это приводит к повышенным затратам на строительство очистных сооружений при их кратковременной работе на полную производительность.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

В зависимости от предъявляемых требований, разработаны очистные сооружения, использующие различные методы очистки: механическая, физико-химическая и др., позволяющие эффективно обезвреживать сточные воды от вредных примесей.

Одним из широко распространенных методов очистки поверхностных стоков является отстаивание. Этот метод выделяет из сточных вод оседающие и всплывающие механические примеси.

Как показывают исследования [8], поверхностный сток наряду с тонкодисперсными частицами содержит и крупные механические примеси, для выделения которых целесообразно применять песколовки. По данным исследований кинетики отстаивания, в дождевом стоке содержание частиц песка с гидравлической крупностью более 15 мм/с колеблется в пределах от 10 до 15%, а в талом стоке – до 20%.

Для удаления основной массы взвешенных веществ и нефтепродуктов поверхностного стока применяются различные конструкции отстойных сооружений, горизонтальные и радиальные отстойники, нефтеловушки, пруды-накопители и т.п. [2, 3, 19]. В последнее время для очистки поверхностного стока начинают применяться тонкослойные полочные отстойники, а также тонкослойные блоки для интенсификации работы прудов-отстойников. Для очистки поверхностного стока до недавнего времени широко применялись пруды-отстойники, сооружения закрытого типа (подземные) и стационарные щитовые заграждения в акватории водоема. Из перечисленных типов отстойных сооружений наиболее эффективными являются пруды-отстойники. Однако эффективность очистки данных сооружений относительно невысока: концентрация взвешенных веществ в воде, выходящей из прудов-отстойников, колеблется в пределах от 20 до 70 мг/л, а содержание нефтепродуктов – от 3 до 7,2 мг/л. Кроме того, подобные сооружения громоздки, вызывают большие трудности при удалении осадка и всплывших нефтепродуктов и занимают большую земельную площадь [8, 20].

В последнее время нашли широкое применение конструкции тонкослойных отстойников [8, 23, 28] для очистки самых разнообразных категорий сточных вод. Использование метода отстаивания в тонком слое позволяет значительно интенсифицировать процесс выделения механических примесей и обеспечить высокую степень осветления в сооружениях, требующих малых площадей и объемов. Эффективность работы тонкослойного отстойника торцевого типа на поверхностном стоке с концентрацией взвешенных веществ 800-3000 мг/л и содержанием нефтепродуктов 20-80 мг/л. Остаточное содержание взвешенных веществ в очищенной воде колеблется от 8-10% (при скорости движения воды в межполочном пространстве 1 мм/с) до 30-40% (при скорости 10 мм/с) от начальной

концентрации в поступающем поверхностном стоке [8, 20].

Очистка промышленно-ливневых сточных вод от нефтепродуктов и взвешенных веществ на сооружениях механической очистки не приносят существенного эффекта. Учитывая, что взвешенные вещества представлены мелкодисперсными частицами, а нефтепродукты – керосином, бензином, маслами, их извлечение в отстойниках составляет 10-20%. В следствии чего требуется дальнейшая доочистка.

Для интенсификации осветления поверхностного стока и обеспечения более глубокой степени очистки, чем достигается в отстойных сооружениях, воду очищают способом фильтрования через различные загрузки из природных и синтетических материалов, обрабатывают коагулянтами [6] и флокулянтами. В настоящее время широко используются фильтры с загрузкой из песка, керамзита, различных полимерных материалов, древесной стружки и др [5, 10, 12, 16, 24, 26].

Отличительной чертой поверхностного стока является возможность повышения концентрации взвешенных веществ, поступающих на фильтры. В этих условиях традиционные песчаные фильтры хотя и обеспечивают удаление основной массы загрязнений, но имеют ряд недостатков: низкую производительность, сложности при регенерации фильтрующего слоя и эксплуатации в условиях периодического поступления сточных вод на очистку. Аналогично песчаным загрузкам не решает проблемы и использование керамзита, вулканических шлаков, торфа, цеолитов и др. [5, 12].

Из фильтров с природной загрузкой для доочистки поверхностного стока успешно применяют каркасно-засыпные фильтры. Конструкция каркасно-засыпного фильтра обеспечивает стабильный эффект очистки при значительных колебаниях качества и количества исходной воды, что весьма важно при очистке поверхностного стока, поскольку позволяет осуществлять промывку фильтрующей среды любой интенсивности без опасности смещения поддерживающих гравийных слоев. Преимуществом этих фильтров является возможность использования контактной коагуляции. Исследования этой конструкции фильтра для доочистки поверхностного стока машиностроительного предприятия показали, что при безреагентном фильтровании концентрация взвешенных веществ и нефтепродуктов в фильтрате не превышает соответственно 5 и 3 мг/л. Продолжительность фильтроцикла при скорости фильтрования 10 м/ч в зависимости от исходной загрязненности воды доставляет 30...36 ч. Контактная коагуляция позволяет обеспечить при той же скорости фильтрования концентрацию взвешенных веществ 3 мг/л и нефтепродуктов

1...1,5 мг/л, продолжительность фильтроцикла при этом составляет 20...24 ч [8].

В последнее время проводятся исследования полимерных материалов, которые отличались бы большей грязеемкостью, обладали невысоким темпом прироста потерь напора при загрязнении и относительно простой регенерацией. Целесообразность применения фильтрующих полимерных материалов, имеющих олеофильные свойства, обуславливается значительным поступлением на фильтры содержащихся в поверхностном стоке нефтепродуктов. В качестве таких фильтрующих материалов все большее распространение получают полимерные высокопористые полистирол [10, 24] и пенополиуретан [7, 16, 18, 26, 27]. Применение синтетических материалов, обладающих высокой сорбционной емкостью, пористость которых достигает 95%, позволяет существенно повысить скорость фильтрования, увеличить продолжительность фильтроцикла и осуществлять процесс очистки с меньшими затратами по сравнению с обычными зернистыми фильтрами.

Учитывая химическое строение пенополиуретана и его пористость, вибро- и ударопрочность, высокие сорбционные свойства, стойкость по отношению к нефтепродуктам, простоту регенерации и низкую стоимость, которые делают его использование для обработки поверхностно-ливневых сточных вод содержащих нефтепродукты экономически и технологически целесообразным.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Защита водоемов от загрязнения нефтепродуктами является одной из важнейших задач охраны окружающей среды. По мере растущего загрязнения водоемов нормы на сброс в них сточных вод, содержащих нефтепродукты, становятся все более жесткими. Особенно высокие требования предъявляются при сбросе сточных вод в черте города, когда нет возможности учитывать разбавление. Содержание нефтепродуктов при этом не должно превышать 0,3 мг/л для водоемов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового использования и 0,05 мг/л для водоемов рыбохозяйственного назначения. Однако достижение этих норм является сложной задачей.

Одним из наиболее эффективных способов удаления нефти и нефтепродуктов с поверхности воды является их поглощение различными веществами и материалами. Особое место среди всех поглощающих материалов занимают эластичные вспененные полиуретаны.

К пенополиуретанам относят полимеры, содержащие в цепи уретановые группы. В

остальном химическое строение цепи полиуретана может быть различным.

Сочетание в полиуретановой цепи различных функциональных групп, таких как: уретановые $-OCONH-$, простые эфирные $-O-$, сложные эфирные $-C(O)-O-$, амидные $-C(O)-NH-$, мочевиные $-NH_2-C(O)-NH_2-$, ароматические $-C_6H_6-$, и алифатические $-CH_2-$, создает благоприятные условия для образования различного характера связей с молекулами многих веществ.

Состав нефтесодержащих сточных вод отличается большой сложностью и разнообразием и зависит от вида, назначения, технологии производства и характеристики исходного сырья. По дисперсному составу нефтепродукты в сточных водах могут быть в свободном, эмульгированном и растворенном состоянии.

Основную массу нефтепродуктов составляют углеводороды трёх классов:

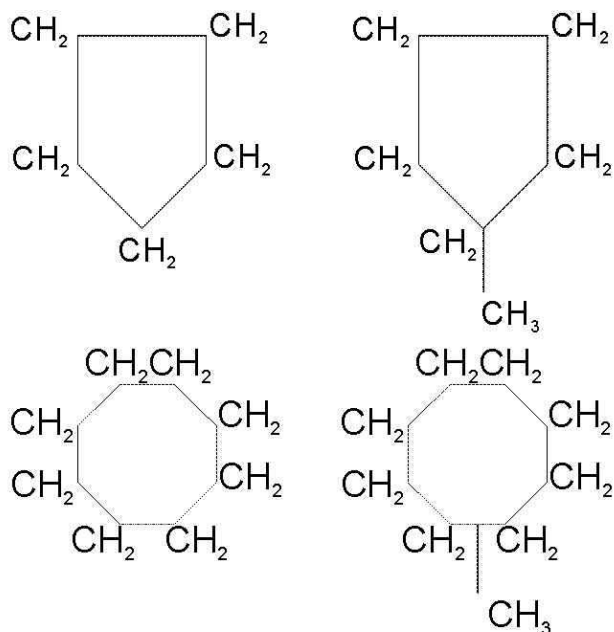
1. насыщенные: парафины C_nH_{2n+2} или

алканы, которые в свою очередь состоят из: н-алканов $CH_3-(CH_2)_n-CH_3$,

изоалканов $R-\underset{\substack{| \\ R}}{CH}-R$ и ненасыщенные

алкены $R-CH=CH-R$;

2. нафтены: циклопентан, метилциклопентан, циклогексан и метилциклогексан,



3. ароматические C_6H_6 .

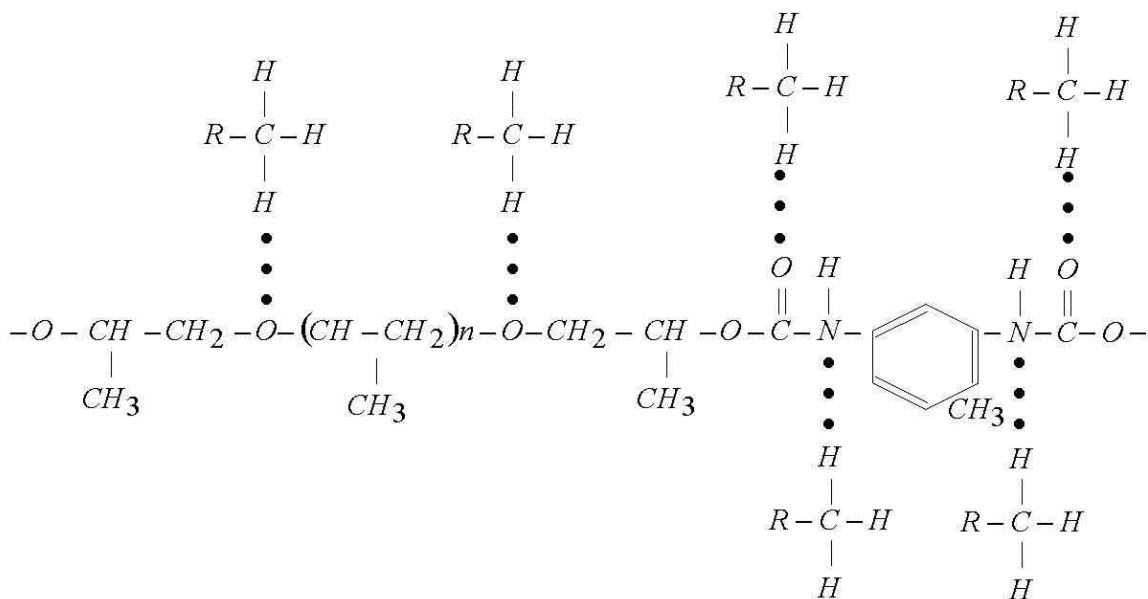


Рис.1. Схема сорбции нефтепродуктов эластичным пенополиуретаном
 Fig. 1. The scheme of oil sorption elastic foam polyurethane

Между углеводородами, содержащимися в нефтепродуктах, и различными по характеру функциональными группами в полиуретановой цепи создаются условия для Ван-дер-Ваальсового взаимодействия. Ввиду того, что в процессе межмолекулярного взаимодействия большая часть этих групп связывается между собой, то в образовании данных связей между эластичным пенополиуретаном и нефтепродуктами принимают участие свободные группы атомов, находящиеся на поверхности ассоциатов.

Согласно [15] в полиуретанах образуются межмолекулярные связи, в частности водородные. Так как пенополиуретан является смешанным полимером, то сложноэфирная группа участвует в образовании водородных связей в гораздо большей степени, чем в чистых сложных полиэфирах. Это обуславливает прочностные свойства пенополиуретана. Таким образом, чем больше водородных связей, тем пенополиуретан прочнее. Наличие протоноакцепторных атомов кислорода в структуре пенополиуретана обеспечивает возможность водородного связывания карбоксилсодержащих компонентов нефтепродуктов исследуемых стоков. В образовании Н-связи могут участвовать водороды уретанового звена (свободные N-H группы) и олефины нефтепродуктов.

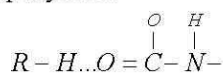


Схема возможной сорбции пенополиуретаном нефтепродуктов представлена на рис. 1. Как видно из рисунка протоноакцепторная группа $-O$ и протонодонорная группа $=N-H$ в уретановой группе пенополиуретана определяют возможность водородного связывания с олефинами нефтепродуктов.

Как видно из выше изложенного пенополиуретан является хорошим сорбентом нефтепродуктов находящихся в поверхностно-ливневых сточных водах благодаря своим физико-химическим свойствам.

Для подтверждения данных исследований создана фильтровальная установка, принципиальная схема которой представлена на рис. 2, в которой проверили очистку дождевых сточных вод от нефтепродуктов и взвешенных веществ.

Фильтр изготовлен в виде металлической колонны диаметром 100 мм и высотой 1500 мм, с загрузкой из эластичного пенополиуретана.

Исследования проводили на имитатах дождевых сточных вод в лабораторных условиях.

Модульный сток получали путем перемешивания соответствующих количеств нефтепродуктов, взвешенных веществ и водопроводной воды в смесительном баке 10 при помощи высокоскоростной мешалки 9. После чего имитат самотеком по трубопроводу 4 оборудованному запорной арматурой через патрубок 3 поступает в фильтрующую колонну 1. Очищенная вода отводится через патрубок 6 трубопроводом 7 с запорной арматурой в бак чистых стоков 8. Фильтровальная установка 1 оснащена съемными крышками 2 и 5 предназначенными для загрузки и выгрузки фильтрующего материала. В нижней и верхней частях фильтрующей загрузки установлены перфорированные перегородки, служащие для ее удержания. Фильтрацию проводили сверху вниз, так как при подаче сточных вод в обратном направлении траектория движения частиц нефтепродуктов и очищаемых сточных вод совпадала, и при этом ухудшалось качество фильтрата.

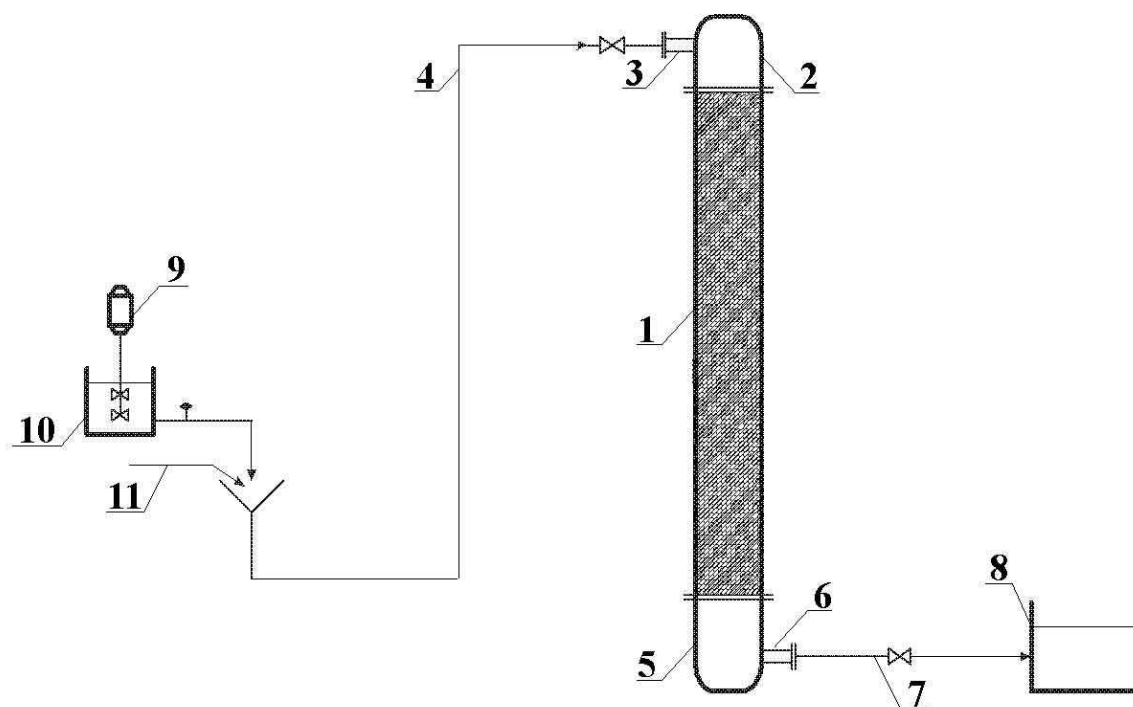


Рис. 2. Технологическая схема лабораторной установки
Fig. 2. Technological scheme of the laboratory setup

По окончании фильтрования фильтрующий материал выгружался и регенерировался механическим способом.

Исследования фильтрующей загрузки проводились при:

- скорости фильтрования, которая была принята одинаковой в обоих случаях, 15 м/ч;
- высоте слоя загрузки – 1,5 м;
- плотности загрузки – 60 кг/м³.

Одной из важнейших технологических характеристик, определяющих эффективность работы фильтра, является нефтегязеёмкость, получаемая определением количества нефтепродуктов, задержанных фильтрующей загрузкой в течение рабочего цикла. Увеличение нефтегязеёмкости фильтра позволяет увеличить продолжительность фильтрования и соответственно уменьшить количество регенераций в определённый промежуток времени, что повышает

технологические и технико-экономические показатели фильтра.

При выборе высоты слоя фильтрующей загрузки исходили из возможности достижения максимальной нефтегязеёмкости фильтрующей загрузки. Согласно проведенным исследованиям нефтегязеёмкость при высоте слоя 1,5 м составляет 15 кг нефтепродуктов на 1 кг пенополиуретана. Также ее можно представить как 0,5 м³ нефтепродуктов на 1 м³ пенополиуретана.

Результаты исследований очистки поверхностно-ливневого стока через загрузку из эластичного пенополиуретана от взвешенных веществ и нефтепродуктов представлены в табл. 1 и табл. 2 соответственно. Каждый результат по определению глубины очистки ливневых сточных вод является средним арифметическим из двух параллельных опытов, рандомизированных по времени.

Таблица 1. Эффект очистки поверхностно-ливневых сточных вод от нефтепродуктов
Table 1. The effect of surface treatment of storm water from oil

№ опыта	Концентрация нефтепродуктов в очищаемой воде, $C_{н}$, мг/л	Концентрация нефтепродуктов в очищенной воде, $C_{н}$, мг/л	Эффект очистки, Э, %
1	25	0,2	99,2
2	50	0,8	98,4
3	100	1,1	98,9
4	150	1,5	99,0

Таблица 2. Эффект очистки поверхностно-ливневых сточных вод от взвешенных веществ
Table 2. The effect of surface treatment of storm water from suspended solids

№ опыта	Концентрация взвешенных веществ в очищаемой воде, $C_{в}$, мг/л	Концентрация взвешенных веществ в очищенной воде, $C_{ч}$, мг/л	Эффект очистки, Э, %
1	100	3,2	96,3
2	500	13,4	97,3
3	700	29,5	95,8
4	1000	47,2	95,3

Исследования показали, что при очистке имитата дождевых вод с исходной концентрацией взвешенных веществ от 100 до 1000 мг/л достигается глубина очистки до 3,2-47,2 мг/л, а также концентрацией нефтепродуктов 25-150 мг/л – 0,2-1,5 мг/л, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к сбросу в городскую канализацию, а также для использования очищенных сточных вод для технических нужд.

Также, проведенные эксперименты показали, что существенное влияние на процесс очистки оказывает высота фильтрующего слоя. В данном случае при высоте фильтрующей загрузки 1,5 м достигается эффект очистки 98-99% при удалении нефтепродуктов и 95-97% – при взвешенных веществах.

По результатам исследований разработан проект компактной установки для очистки поверхностно-ливневых сточных вод. Преимуществами данной установки являются:

- высокая степень очистки,
- низкие эксплуатационные затраты,
- режим обслуживания установки – периодический;
- компактность;
- простота монтажа.

ВЫВОДЫ

1. Поверхностный сток с городских территорий и с промышленных площадок, внося значительное количество загрязняющих веществ в водные объекты, вызывает их загрязнение и заиливание. Донные отложения формирующиеся в водоемах и водотоках в дождливую погоду, нарушают жизнедеятельность микроорганизмов, что отрицательно сказывается на биоценозе и процессах самоочищения. Окисление органических примесей этих донных отложений приводит к ухудшению кислородного режима водоема в течении длительного времени после выпадения дождя. Поскольку поверхностный сток является одним из источников загрязнения окружающей среды, организованное его отведение и обезвреживание является важнейшим требованием охраны природных вод.

2. На основании проведенного анализа существующих методов очистки поверхностно-ливневого стока можно отметить, что, используя высокие сорбционные способности высокоэффективных полимерных материалов в качестве фильтрующих загрузок можно получить компактные очистные установки, а эластичность и упругость этих материалов позволит выполнить регенерацию фильтрующей загрузки механическим способом без использования промывных вод.

3. Химическое строение пенополиуретана и его высокая пористость определяют возможность использовать его как эффективный сорбент нефтеобразных веществ. Применение эластичных пенополиуретанов, обладающих высокой сорбционной емкостью, в качестве фильтрующей загрузки, позволит существенно повысить скорость фильтрования, увеличить продолжительность фильтроцикла и осуществлять процесс очистки с невысокими затратами.

4. Исследования показали, что нефтегряземкость фильтрующей загрузки зависит от относительного содержания взвешенных веществ и нефтепродуктов. А также, что по мере работы пенополиуретанового фильтра загрязнения распределяются неравномерно по всему слою загрузки, что связано как с неравномерностью поступлений загрязнений в разные слои фильтра, так и с незначительным уплотнением загрузки в нижней его части.

5. Проведенные исследования работы фильтра с пенополиуретановой загрузкой показали эффективность применения фильтрования через загрузку из эластичного пенополиуретана для обеспечения требуемого качества очистки сточных вод и предотвращения загрязнения водных объектов нефтепродуктами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Klein L.A. 1974 Sources of Metals in New York Citi Wastewater //I.WPCF. V.46. №12.
2. Анопольский В.Н., Рогов В.М., Шборов В.А. 1981 Очистка поверхностного стока с промышленных площадок машиностроительных предприятий. // Очистка

- и использование поверхностного стока территорий городов и промплощадок: материалы семинара. – М.: МДНТП – 107-112.
3. Баранова Л.Б., Потанина В.А., Штондина В.С., Мясников И.Н., Захарова Н.А. 1991 Очистка промышленно-ливневых сточных вод предприятий. // Водоснабжение и санитарная техника. — № 3 – 24-25.
 4. Беличенко Ю.П. 1981 О проблеме охраны водоемов от загрязнения поверхностным стоком с территорий городов. // Очистка и использование поверхностного стока с территорий городов и промплощадок: «Материалы семинара». – М.: МДНТП. – 3-9.
 5. Ганбаров Э.С. 2004 Безреагентная очистка поверхностных вод с использованием электрохимического окисления и сорбции. // Водоснабжение и санитарная техника. – № 12 – 21-23.
 6. Гандурина Л.В., Буцева Л.Н., Штондина Л.В., Меншутин Ю.А., Фомичева Е.В., Воронов В.И. 2004 Интенсификация очистки промышленно-ливневых вод на Угрешских очистных сооружениях. // Водоснабжение и санитарная техника. – № 5 – 17-20.
 7. Гетманец Н.И. 2011 Исследования процесса обработки поверхностных сточных вод с применением синтетических материалов // Сучасні екологічно безпечні та енергозберігаючі технології в природокористуванні / Зб. тез доповідей міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених і студентів, 26-28 квітня 2011 року, м. Київ: в 2-ох частинах – К.: КНУБА. – ч. 2 – 78-81.
 8. Дикаревский В.С., Курганов А.М., Нечаев А.П., Алексеев М.И. 1990 Отведение и очистка поверхностных сточных вод – Л.: Стройиздат. – 224.
 9. Діренко Г.О. 2010 Екологічно безпечні технології очищення поверхневого стоку з урбанізованих територій (на прикладі м. Києва): автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук: спец. 21.06.01 „Екологічна безпека” / Г.О. Діренко – К.: КНУБА. – 21.
 10. Журба М.Г. 1971 Безреагентная очистка воды на фильтрах из пенополистирола. // Водоснабжение и санитарная техника. – № 8 – 4-7.
 11. Карелин Я.А., Кичев Д.С. 1993 Исследования поверхностных сточных вод в Волгограде. // Водоснабжение и санитарная техника. - № 10 – 11-12.
 12. Китаев А.Л. 1997 Очистка поверхностного стока с территории городов. // Водоснабжение и санитарная техника. – № 2 – 25-27.
 13. Курганов А.М., Алексеев М.И., Быков А.П. 1996 Расчетная продолжительность дождей для систем водоотведения. // Водоснабжение и санитарная техника. — №11 – 14-16.
 14. Лапшев Н.Н., Смелов Н.Ф. 1995 Охрана водоемов Санкт-Петербурга от загрязнения сточными водами. // Водоснабжение и санитарная техника. – № 7 – 2-4.
 15. Липатов Ю.С., Керча Ю.Ю., Сергеева Л.М. 1970 Структура и свойства полиуретанов. Киев: Наук. думка – 277.
 16. Лукашенко С.В., Гетманец Н.И. 2009 Процесс фильтрования через загрузку из эластичных пенополиуретанов // Экология энерго-ресурсосбережение, охрана окружающей среды и здоровье человека, утилизация отходов / Сб. научн. Статей XVII междунар. научн.-практ. конф., 1-5 июня 2009г. г. Щелкино, АР Крым : в 2 т. / УкрГНТЦ «Энергосталь». – Харьков: «Издательство САГА». – Т 2. – 296-299.
 17. Лукашенко С.В., Гетманец Н.И. 2009 Существующие методы очистки поверхностно-ливневого стока и пути их совершенствования // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – Вип. 51. – 140-143.
 18. Лукашенко С.В., Гетманец Н.И., Ярошенко Ю.В. 2011 Очистка нефтесодержащих сточных вод с помощью фильтра с пенополиуретановой загрузкой // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ – Вип. 63. – 445-449.
 19. Мишуков Б.Г., Козьмина И.М., Иваненко И.И., Бондарева О.Е., Гусева В.А. 1995 Очистка поверхностного стока. // Водоснабжение и санитарная техника. – № 9 – 3-4.
 20. Молоков М.В., Шифрин В.Н. 1977 Очистка поверхностного стока с территории городов и промышленных площадок – М.: Стройиздат. – 104.
 21. Тарнопольская Н.К., Бурмистрова Л.Я., Тарнопольская М.Г. 1993 Контроль за сбросом поверхностных сточных вод в Москве. // Водоснабжение и санитарная техника. – № 10 – 9-10.
 22. Проблемы больших городов. Обзорная информация – М.: ГОСИНТИ, 1980. – Вып. 20 – 28.
 23. Свердлов И.Ш. 1998 Очистка сточных вод автозаправочных станций. // Водоснабжение и санитарная техника. - №1 – 25-27.
 24. Хамад Имам Ахмад 2007 Доочистка стічних вод на установках з волокнисто-пінополістирольним завантаженням: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук: спец. 05.23.04 „Водопостачання, каналізація” / Хамад Імам Ахмад – Київ: КНУБА. – 19.
 25. Эпоян С.М., Лукашенко С.В., Гетманец Н.И. 2010 Загрязненность поверхностного стока с селитебных территорий городов. // Сучасні проблеми охорони довкілля та раціонального використання ресурсів у водному господарстві: міжнар. наук.-практич. конфер., 13-17 квітня 2010р. м. Миргород: матер. конф. – К.: Т-во «Знання» України. – 48-50.

26. Эпоян С.М., Лукашенко С.В., Гетманец Н.И. 2009 Процесс фильтрования нефтепродуктов через загрузку из полимерных материалов // Экологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення / Зб. наук. статей V між нар. наук.-практ. конф., 7-11 вересня 2009 р. м. Алушта, АР Крим: в 2 т. / УкрНДЦЕП – Харків: Райдер. – Т 2. – 366-369.
27. Эпоян С.М., Лукашенко С.В., Гетманец Н.И. 2013 Эффективный метод очистки поверхностного стока // Сучасні проблеми охорони довкілля та раціонального використання ресурсів у водному господарстві: практ. конф., 22-26 квітня 2013р., м. Миргород: матер. конф. – К.: Т-во «Знання» України. – 40-42.
28. Эпоян С., Сыроватский А., Карагяур А., Бабенко С., 2012. Повышение эффективности работы тонкослойного отстойника. MOTROL. –

Commission of motorization and energetics in agriculture. – Lublin - Rzeszów. – Vol. 14, № 6. – 247–250.

INTENSIFICATION OF SURFACE-STORM SEWAGE

Summary: The modern methods of superficial-storm waste water treatment are considered in the article. There are some directions of surface-storm sewage improvement are considered. A structure and physical and chemical properties of foam polyurethane are shown. The results of researches on oil-cut waste waters with application of the filter with polyurethane loading are given. Principal parameters of work of the filter are defined.

Key words: surface-storm sewage, foam polyurethane, mineral oil, suspended solids, filtration, purification, filter, effect of treatment.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ РАБОТЫ ОБОРОТНЫХ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Сергей Мовчан

Таврический государственный агротехнологический университет
Адрес: 72310 Запорожская обл., г. Мелитополь, пр. Б. Хмельницкого, 18
E-mail: e - mail: movchantsaa@rambler.ru

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы интенсификации работы оборотных систем водоснабжения, за счёт увеличения эффективности обработки сточных вод, повышения надёжности оценки качества их очистки и использования экологически безопасных способов утилизации, образующегося осадка, решение которых позволяет решить не только техническую задачу но и экологическую проблему.

Ключевые слова: оборотные системы водоснабжения, интенсификация работы, оперативные средства контроля, управление процессом очистки, утилизация осадков сточных вод, реагенты.

ВВЕДЕНИЕ

Промышленные предприятия являются главными потребителями воды из водных источников страны. Большая часть этой воды используется в оборотных системах и циклах отдельных участков разных отраслей хозяйственной деятельности. Поэтому обеспечение надёжного водопотребления и эффективного выполнения технологических операций является основной задачей эксплуатации систем оборотного водоснабжения.

Сточные воды гальванического производства непостоянны по химическому составу и могут изменяться в широких пределах. В таких водах содержится 0,5 ... 500 мг/л двух- и трёхвалентного железа; 0,07 ... 95 мг/л общего хрома; 0,1 ... 3,6 мг/л двухвалентного никеля; 0,15 ... 32 мг/л двухвалентной меди; 0,01 ... 50 мг/л двухвалентного свинца; 0,05 ... 10 мг/л цианидов; 0,15 ... 3,5 мг/л нефтепродуктов и 10...900 мг/л нерастворимых минеральных веществ [6].

Гальванические производства существенно отличаются по номенклатуре покрытий, виду и мощности производства, номенклатуре обрабатываемых деталей; их различают по габаритам и массе, условиям организации водного хозяйства промышленных предприятий. При этом удельный расход воды находится в пределах от $1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$ до 4 м^3 на 1 м^2 гальванопокрытий.

Среднегодовой объём загрязнённых сточных вод, сбрасываемых только промышленностью, составляет около 500 млн. м^3 , что оказывает существенный вклад на неудовлетворительное состояние водных объектов. Повышение антропогенного влияния на водные объекты связано с постоянно снижающейся производительностью очистных сооружений. Кроме того, не на должном уровне решаются вопросы подготовки воды, используемой в том или ином технологическом процессе, что очень ярко

проявляется при глубокой очистке сточных вод в широком диапазоне и номенклатуре компонентов загрязнителей [6, 9].

Кроме того, оперативные средства контроля, используемые для оценки качества очистки сточных вод, не в полной мере отвечают современным требованиям, выдвигаемых к технологии водоочистного оборудования. Связано это не только с точностью контроля качества очистки и принятия оперативных решений, а и разработкой новых, более чувствительных, точных, селективных и не слишком дорогостоящих методов оперативного анализа и контроля.

Необходимо отметить, что в общем балансе очистке сточных вод, весомая часть принадлежит отходам, образующихся при их обработке. В конце двадцатого столетия общий объём реализованной в Украине воды превысил 3,3 млрд. м^3 , из которых 2,9 млрд. м^3 в виде городских сточных вод пропущено через очистные сооружения, с образованием осадков, в объёме 1,1 млн. т по сухому веществу [10, 12].

Кроме того, осадки сточных вод относятся к числу экологически опасных отходов. Во многих случаях вопросы его обезвреживания и экологически безопасного размещения в природной среде не решены, а иногда решаются без учёта экологического равновесия в природе.

Решение вопросов повышения надёжности работы систем гибких автоматизированных гальванических линий позволяет решать вопросы повышения надёжности в комплексе, что является важным в работе водоочистного оборудования [6].

Поэтому важным является не только развитие научных и практических основ повышения экологической безопасности эксплуатации систем водоснабжения, но и разработкой комплексных методов интенсификации работы оборотных систем водоснабжения. Комплексные методы должны не только повысить уровень интенсификации работы оборотных систем водоснабжения, но и решать вопросы, связанные с улучшением качества очистки

сточных вод, оценкой их качества и эффективной утилизацией образующихся при этом осадков.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Интенсификация работы оборотных систем водоснабжения промышленных предприятий является одной из главных проблем, решение которой зависит от многих факторов, определяющих не только надежность, но и эффективность работы очистных сооружений и промышленности в целом.

Вопросам интенсификации отдельных составных частей оборотных систем водоснабжения посвящены как монографии и учебные пособия [4, 5, 8, 11, 22, 23], так и диссертационные исследования разных уровней [7, 9, 21, 24] рассматривающие работу оборотных систем водоснабжения, очистки и подготовки воды, а также утилизации и обработки осадков, образующихся в процессах водоподготовки.

Рассмотрены вопросы эксплуатации систем водоснабжения в которых обобщены результаты прогрессивной технологии очистки природных вод, с использованием реагентов, позволяющие очищать, кондиционировать и обезвреживать природные воды [5].

Реагентная обработка очистки сточных вод широко используется, как один из надёжных методов доочистки сточных вод. При этом широкая номенклатура реагентов позволяет достигнуть высоких значений при интенсификации работы систем водоснабжения [8].

Способы построения гибкого автоматизированного производства из технологических модулей в соответствии с требованиями стандартов, которые обеспечивают экологическую чистоту гальванического производства – являются важным вопросом, обеспечивающим надёжную работу оборотных систем водоснабжения [6].

Фильтрация является одним из наиболее надёжных и эффективных способов доочистки воды, поэтому интенсификация процесса доочистки позволяет повысить надёжность их работы, которая достигается за счёт улучшения качества обработки воды [7].

Одной из важных проблем для крупных городов является образующийся осадок, накапливающийся на иловых площадках. Поэтому использование методов интенсификации процесса обезжелезивания осадков городских сточных вод на иловых площадках позволяет решить не только техническую задачу, но и экологическую, которая связана с уменьшением влияния на водные объекты и ограничением влияния на окружающую среду [10, 12, 24].

Одним из направлений интенсификации работы водоочистных сооружений является повышение надёжности работы отдельных её составных частей, которая достигается в работе

систем промышленного водоснабжения [11].

Теоретически обоснованы и разработаны методы интенсификации работы системы водообеспечения, которые позволяют решить задачи водоснабжения крупных промышленных городов и объектов хозяйственной деятельности [21].

В монографии изложены научные основы повышения эффективности работы сооружений водоснабжения при подготовке питьевой воды с использованием ресурсосберегающих технологий, позволяющие решать не только технические задачи, а и экологические [22].

При реконструкции и интенсификации сооружений водоснабжения и водоотведения важное значение приобретает надёжная и эффективная работа отдельных её элементов и составных частей: пористых фильтров, распределительных систем и др. [23].

Вопросы экологической безопасной технологии обработки осадков рассматриваются совместно с вопросами их рационального использования при утилизации и обезвреживании осадков [12, 24].

При очистке сточных вод гальванического производства важное значение приобретают вопросы комплексной их переработки, при этом рассмотрены принципы создания и функционирования малоотходных технологических схем переработки сточных вод гальванического производства. Выполнен анализ экономических и экологических аспектов применения различных методов регенерации, утилизации и очистки сточных вод. При этом, особое внимание уделено вопросам рационального использования воды в гальваническом производстве и охране окружающей среды [9].

В процессах очистки сточных вод важное значение приобретает конструирование и эксплуатация водоочистного оборудования. Сточные воды гальванического производства различны по своему составу, поэтому в каждом конкретном случае вопрос комплектования блоками очистки решается исходя из особенностей обработки сточных вод и последующего её использования в оборотных системах водоснабжения промышленных предприятий. Рассмотрены вопросы использования и применения в промышленности водоочистного оборудования, которые тесно связаны с охраной окружающей природной среды и рациональным использованием водных ресурсов. Описаны действующие и перспективные конструкции аппаратов, представлены рекомендации по их выбору и размещению в схемах систем подготовки воды [4].

Анализ литературных источников позволяет отметить, что не каждое направление научных исследований решает вопросы интенсификации

работы оборотных систем водоснабжения в комплексе. Поэтому решение вопросов повышения эффективности работы оборотных систем водоснабжения определяет актуальность выбранного направления исследований.

Кроме того, повышение уровня интенсификации работы оборотных систем водоснабжения возможно за счёт решения этого вопроса в комплексе, который позволяет повысить степень очистки, обеспечить эффективность оценки качества их очистки и использовать экологически безопасные способы для утилизации образующегося осадка.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Цель работы состоит в разработке теоретически обоснованных и экспериментально подтвержденных методов интенсификации работы оборотных систем водоснабжения, направленных на решение важной народно – хозяйственной задачи упорядочения работы оборотных систем водоснабжения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи, функционально связанные между собой в технологии работы оборотных систем водоснабжения:

1. Повысить эффективность очистки сточных вод промышленных предприятий, за счёт использования химических компонентов при нейтрализации ионов тяжёлых металлов гальванических отделений.

2. Разработать новые и усовершенствовать существующие оптические методы контроля качества очистки сточных вод, за счёт определения гидромеханических параметров частиц водных растворов.

2. Для обеспечения экологической безопасности, снижения уровня нагрузки на водные объекты и уменьшения их загрязнения использовать экологически безопасные способы утилизации осадков сточных вод.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Решение вопросов интенсификации работы оборотных систем водоснабжения промышленных предприятий необходимо решать по каждому из рассматриваемых направлений.

Как показала практика обработки сточных вод гальванического производства, содержание в сточных водах большого количества химических компонентов в широком диапазоне, накладывает свой отпечаток не только на их очистку (нейтрализацию, обезвреживание), а также на выбор технологии и оборудования.

Кроме того, очистка сточных вод, является той отправной точкой, которая определяет эффективность работы всех составных частей оборотных систем водоснабжения и уровень интенсификация их работы.

При очистке сточных вод гальванического производства используются реагенты, которые позволяют повысить эффективность их очистки от ионов тяжёлых металлов.

В качестве химических компонентов используются химические компоненты в определённом соотношении к шестивалентному хрому: Cr^{6+} : ПАВ (поверхностно - активные вещества): NaOH (едкий натрий) : $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ (пирофосфат натрия): Na_2SiO_3 (метасиликат натрия): Na_2CO_3 (сода кальцинированная): $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ (триполифосфат натрия), с общей концентрацией в пределах 50 ... 100 мг / дм^3 [1, 2, 15, 17, 19].

Соотношение химических компонентов к Cr^{6+} (мас. ч.) приведено в таблице 1.

Таблица 1. Соотношение химических компонентов к Cr^{6+} (мас. ч.)
Table 1. Chemical components and Cr^{6+} (mass part)

ПАВ	0,15 ... 0,5
едкий натрий (NaOH)	0,05 ... 0,5
пирофосфат натрия ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$)	0,15 ... 0,5
метасиликат натрия (Na_2SiO_3)	0,15 ... 0,5
сода кальцинированная (Na_2CO_3)	0,05 ... 0,5
триполифосфат натрия ($\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$)	0,05 ... 0,5,

Введение химических компонентов осуществляется в определённой последовательности

и соотношении к шестивалентному хрому. Последовательность введения химических веществ, время до и после введения приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Эффективность очистки сточных вод гальванического производства, с использованием поверхностно – активных веществ, с введением в начале процесса

Table 2 – The efficiency of galvanic production wastewater treatment with the introduction of the surfactants at the beginning of the process

№ п / п	Реагент	Время перед предыдущим введением, минут	Время введения (работы) реагенту, минут	Эффективность очистки, %		
				Ионы тяжёлых металлов	Взвешенные вещества	Масла та нефтепродукты
1.	ПАВ	-	3	97,0	97,0	96,0
2.	Na OH	1 - 2	4	96,0	95,0	97,0
3.	Na ₂ CO ₃	1 - 2	5	97,0	97,0	96,5
4.	Na ₄ P ₂ O ₇	2 - 3	5	97,5	99,0	97,0
5.	Na ₅ P ₃ O ₁₀	3 - 4	5	98,5	97,0	97,0
6.	Na ₂ Si O ₃	4 - 5	5	98,0	98,0	96,5

На первом этапе добавляют ПАВ, далее едкий натрий (Na OH), которые вводят при общей температуре водного раствора 40 – 50 °С и вода с повышенным содержанием жирных компонентов, образуя раствор мыльных продуктов, снижает поверхностное натяжение и натяжение между фазами, вследствие адсорбции и ориентирования молекул на поверхности раздела.

На следующем этапе используют соду кальцинированную (Na₂ CO₃), которая образует определённую кислотность в процессе гидролиза, вследствие протекающих химических реакций с водой, при введении солей фосфорных и полифосфорных кислот, а именно пиррофосфата натрия (Na₄ P₂ O₇) и тринатрий фосфата (Na₅ P₃ O₁₀), которые эффективно очищают сточные воды, с повышенным содержанием солей кальция и магния сточной воды, эффективно их связывая, при добавлении метасиликат натрия (Na₂ Si O₃), когда вода характеризуется низким уровнем кислотности, принимая коллоидную форму, усиливая ингибирующее действие раствора при очистке сточных вод.

Одним из основных показателей обработки сточных вод является эффективность очистки от ионов тяжёлых металлов. Показатели эффективности отработанного моющего раствора (ОМР), в зависимости от состава и соотношения химических компонентов приведено в табл. 3.

При введении ПАВ затраты электрической энергии практически не меняются и находятся на уровне 2,3 ... 2,5 кВт/ час. м³, что также не существенно влияет на объём образующегося при этом осадка, который составляет 2,0 ... 2,15 от первоначального объёма.

На следующем этапе добавляются следующие компоненты: метасиликат натрия (Na₂SiO₃), сода кальцинированная (Na₂CO₃) которые позволяют на 15 – 20 % снизить объём образующегося осадка, что составляет 1,50 ... 1,75 от первоначального объёма и на 10 ... 15 % уменьшить затраты электрической энергии, которые составляют 1,85 – 1,90 кВт/ час. м³.

С введением следующего компонента триполифосфат натрия (Na₅ P₃ O₁₀) происходит уменьшение затрат электрической энергии **что** составляет 1,75 ... 1,85 кВт/ час. м³, объём образующегося осадка снижает до 1,45 ... 1,70.

В конце комплекса добавляют пирофосфат натрия (Na₄ P₂ O₇), который не в полном объёме уменьшает объём осадка, что связано с стабилизирующим действием пирофосфата, а затраты электрической энергии существенно уменьшаются и достигают значения 1,25 ... 1,50 кВт / час. м³.

Таблица 3 – Показатели эффективности отработанного моющего раствора, в зависимости от состава и соотношения химических компонентов

Table 3 – Performance indicator of used washing materials, depending on chemical composition and ratios of components

№ п / п	Основной компонент	Состав химических компонентов	Эффективность очистки, %
1.	Cr ⁶⁺	ПАВ : Na ₂ Si O ₃ : Na ₂ CO ₃ : Na ₅ P ₃ O ₁₀	98,0 ... 98,5
2.	Cr ⁶⁺	Na ₂ Si O ₃ : Na ₄ P ₂ O ₇ : Na ₂ CO ₃ : Na ₅ P ₃ O ₁₀	98,5 ... 99,5
3.	Cr ⁶⁺	ПАВ : Na ₄ P ₂ O ₇ : Na ₂ Si O ₃ : Na ₂ CO ₃ : Na ₅ P ₃ O ₁₀	98,5 ... 99,5
Порядок введения химических компонентов по этапам			
4.	Cr ⁶⁺	ПАВ	99,0 ... 99,5
5.	Cr ⁶⁺	Na ₂ Si O ₃ : Na ₂ CO ₃	98,0 ... 99,5
6.	Cr ⁶⁺	Na ₄ P ₂ O ₇	98,0 ... 99,5
7.	Cr ⁶⁺	Na ₅ P ₃ O ₁₀	99,0 ... 99,5

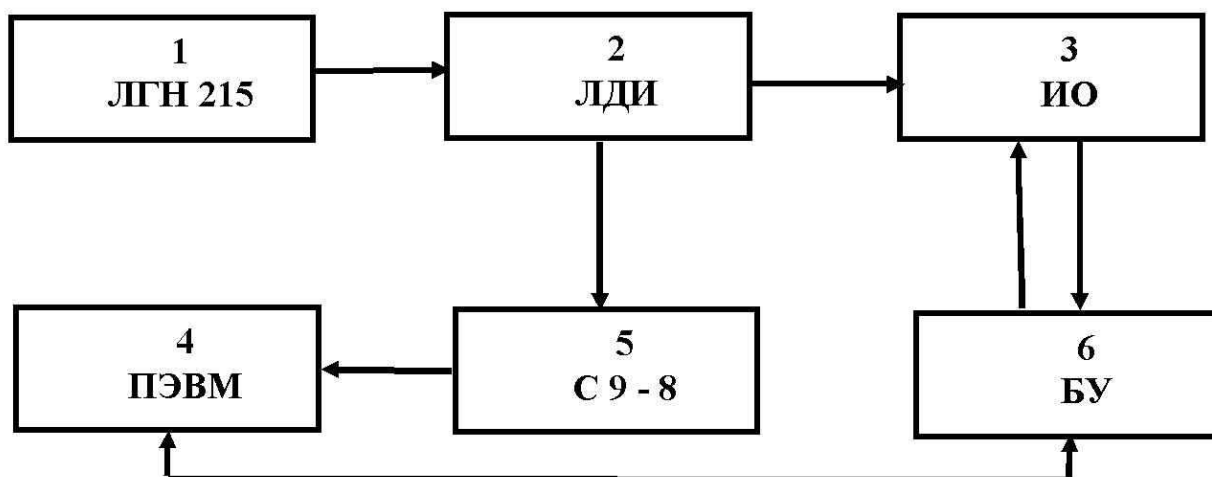


Рис. 1 Блок - схема лазерного доплеровского интерферометра для контроля параметров частиц в сточных водах: 1 - лазер ЛГН - 215; 2 - лазерный доплеровский интерферометр; 3 - исследуемый объект и узел сканирования (измерительная ячейка); 4 - персональная электрическая вычислительная машина (ПЭВМ «Нейрон»); 5 - цифровой запоминающий осциллограф С - 9 - 8; 6 - блок управления исследуемого процесса

Fig. 1 Block diagram of the laser Doppler interferometer to control the parameters of the particles in the waste waters: 1 – laser LGN - 215; 2 – laser Doppler interferometer; 3 – the object of study and the node of scanning (a measuring); 4 – the personal computer (HS Neuron); 5 – the digital storage oscillograph С 9 - 8; 6 – the control unit of the process

Таким образом, использование комплекса химических веществ, введение которых обусловлено их последовательностью и временем до и после предыдущего компонента, позволяет стабилизировать и достичь эффективность очистки сточных вод на уровне 98,5 ... 99,5 %.

Оценку качества очистки сточных вод проводили с использованием современных оптических схем, позволяющих определять в режиме реального времени (рис. 1). Использование разработанных оптических схем позволяет представить качественную очистку сточных вод в широком диапазоне загрязнений, за счёт определения гидромеханических параметров частиц водных растворов: электрофоретической скорости, электрокинетического дзета - потенциала и размеров частиц (эффективного диаметра) [13, 14, 16, 18, 20].

Основные технические характеристики разработанной блок - схемы лазерного

доплеровского интерферометра для контроля гидромеханических параметров частиц водных растворов представлены в таблице 4.

Использование ПЭВМ и специально разработанных программ обеспечивает автоматизацию, и управления процесса измерения параметров частиц в реальном времени и обработки экспериментальных данных.

При утилизации осадков, образующихся при очистке сточных вод, необходимо рассмотреть санитарно – экологические требования, которые к ним предъявляются при их получении и дальнейшей утилизации.

Производственные и бытовые сточные воды являются источником образования большого количества редких осадков (шлама), вследствие чего их обработка создаёт условия для разработки экологически безопасных способов их утилизации.

Таблица 4 Основные технические характеристики разработанной блок - схемы лазерного доплеровского интерферометра контроля параметров частиц водных растворов

Table 4 – Basic specifications of the developer flowchart of laser Doppler interferometer to control parameters of the particles of water solutions

№ п / п	Наименования параметров	Значение параметров измерения
1.	Диапазон измеряемых скоростей частиц, м / с	$10^{-3} \dots 10^2$
2.	Диапазон измеряемых диаметров частиц, мкм	10 ... 500
3.	Расстояние до исследуемого объекта, мм	10 ... 1000
4.	Размеры зондируемой зоны, мм	0,01 ... 1,0

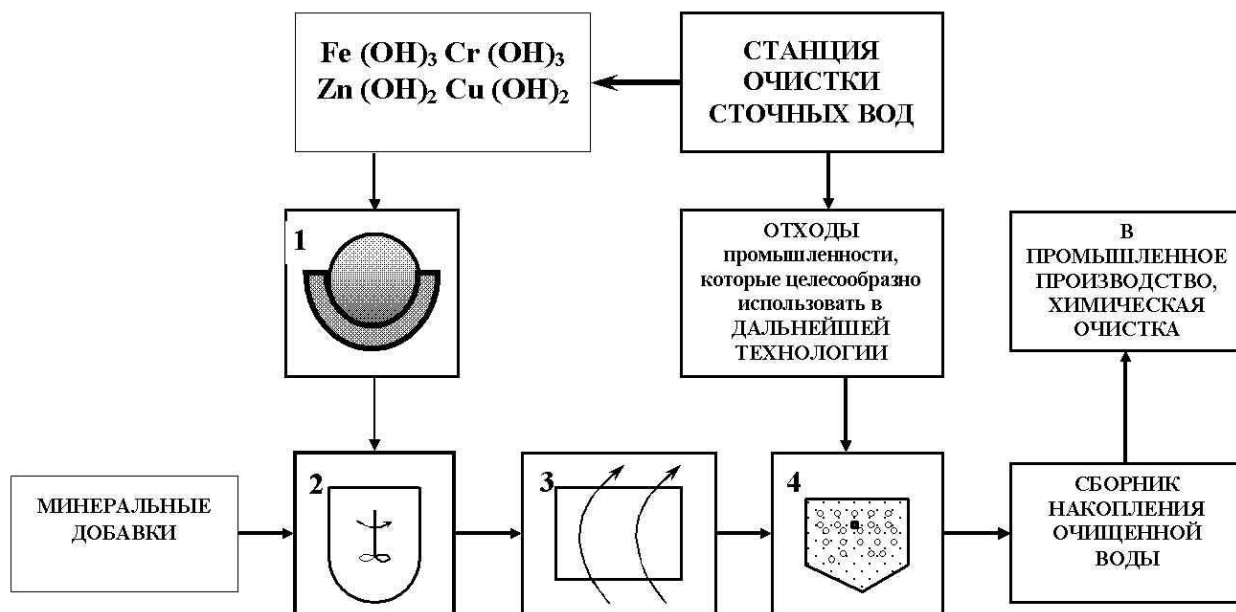


Рис. 2 Технологическая схема утилизации осадков сточных вод промышленных предприятий: 1 - устройство для обезвоживания осадков; 2 - камера реакции; 3 - камера тщательного перемешивания; 4 - установка для сушки

Fig. 2 Technological scheme of sewage sludge disposal for industrial enterprises: 1 - the device; 2 - the reaction; 3 - the thorough; 4 - the apparatus for drying

При обработке осадков (шламов), образующихся вследствие химической и электрохимической обработки сточных вод, необходимо выполнить две основные операции: концентрация твёрдой фазы, за счёт выделения излишней воды и выделение осадков из воды, которая поступает непосредственно на очистку. Однако, в большинстве случаев, вследствие непосредственного сбрасывания осадков сточных вод в окружающую среду, которые не обработаны, не всегда имеется возможность их утилизировать.

Технологическая схема утилизации осадков сточных вод промышленных предприятий представлена на рис. 2.

Разработанная технологическая схема утилизации осадков (шламов) производственных сточных вод гальванических отделений обеспечивает следующие технические параметры: производительность (по сухому остатку) 1 ... 2 т / сутки; удельные минеральные добавки – 15 ... 25 % (от общей массы осадка); удельные затраты электрической энергии до 6 ... 8 кВт час / тонну; удельные затраты водоотведения промышленности 10 ... 15 % (от общей массы осадка).

Для обеспечения экологической безопасности утилизации осадков предполагается их использование в качестве добавок в строительной индустрии, при изготовлении строительных материалов [3].

Используя соответствующие технологии обработки шламов можно получить обезвоженные осадки сточных вод в виде брикетов, которые принимают любую форму. Полученные таким образом осадки используют в строительстве полигонов твёрдых бытовых стоков, при складировании, а также, в процессах химической очистке сточных вод, при их нейтрализации или обезвреживании.

ВЫВОДЫ

Анализ современного состояния работы оборотных систем водоснабжения подтверждает актуальность исследований, направленных на теоретическую разработку и практическое усовершенствование комплексных методов интенсификации работы оборотных систем водоснабжения.

1. Для повышения эффективности очистки сточных вод промышленных предприятий используется комплекс химических веществ, в определённом соотношении к шестивалентному хрому, что позволяет стабилизировать эффективность очистки сточных вод от ионов тяжёлых металлов до 99,0 ... 99,5 %, при высоких начальных концентрациях загрязняющих компонентов, главным образом шестивалентного хрома и других ионов тяжёлых металлов. При этом затраты электрической энергии уменьшаются на 10

... 15 % с 7,1 ... 9,2 кВт год. / м³ до 5,8 ... 6,3 кВт год. / м³.

2. С использованием современных оптических методов лазерной доплеровской интерферометрии, разработано методику определения гидромеханических параметров частиц водных растворов, для оценки качества очистки сточных вод, позволяющие автоматизировать и управлять процессами их измерения. При этом, максимально допустимая погрешность алгоритма оптимизации определения гидромеханических параметром частиц водных растворов, при решении обратной задачи, составляет 6 %. При значениях максимального диаметра частицы $D = 7,5 \text{ мкм}$, измерительная лазерная установка имеет следующие параметры: $d = 0,1 \text{ мм}$, $\alpha = 8^\circ$ и $E = 2B / \text{мм}$.

3. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработана технология обезвоживания осадков сточных вод, с их дальнейшим использованием в качестве добавок в строительной индустрии, при которой объём осадка уменьшается в 2,0 ... 2,5 раза. При обезвоживании осадков величина избыточного давления составляет 1,5 ... 2,0 атм. и влажностью на уровне 78 ... 84 %. Удельный вес находится в диапазоне 970 ... 2120 кг / м³, а удельные затраты электрического тока - 6 ... 8 кВт час / тону.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. № 1730045 СССР, МКИ С02F1/46. Способ очистки хромсодержащих сточных вод / Н. И. Бунин, С. И. Мовчан; Мелитопольский институт механизации сельского хозяйства. - № 4670283 / 26; заявл. 30. 03. 89; опубл. 30. 04. 92, Бюл. № 16.
2. А.с. № 1730046 СССР, МКИ С02F1/46. Способ очистки хромсодержащих сточных вод / Н. И. Бунин, С. И. Мовчан; Мелитопольский институт механизации сельского хозяйства - № 4670283 / 26; заявл. 30. 03. 89; опубл. 30. 04. 92, Бюл. № 16.
3. А.с. № 1668151 СССР, МКИ В28В7/38. Смазка для форм / Н.И. Бунин, Л.И. Дворкин, И.А. Шамбан, С.И. Мовчан; Украинский институт инженеров водного хозяйства - 466452 / 33; заявл. 30. 03. 89; опубл. 07. 08. 91, Бюл. № 29.
4. Веселов Ю. С. 1985 Водоочистное оборудование: Конструирование и использование / Ю. С. Веселов, И. К. Лавров, Н. И. Рукобратский - Л.: Машиностроение, Ленинградск. отдел. - 232.
5. Водопостачання (очистка природних вод): навч. посібник / С. М. Епоян, Г. І. Сухоруков, О. Г. Друшляк, В.В. Шилін. - Харків: Основа, 2001. - 191.
6. Гибкие автоматизированные гальванические линии: Справочник / В. Л. Зубченко, В. И. Захаров, В. М. Рогов и др.; Под общ. ред. В. Л. Зубченко. - М.: Машиностроение, 1989. - 672.
7. Гироль Н. Н. 1994 Интенсификация процесса доочистки сточных вод фильтрованием; дис. доктора техн. наук: 05.23.04 / Гироль Николай Николаевич. - Харьков. - 384.
8. Душкин С. С. 1991 Интенсификация реагентных методов очистки воды: учебное пособие / С. С. Душкин. - К.: УМК ВО. - 168.
9. Запольский А. К. 1989 Комплексная переработка сточных вод гальванического производства / А. К. Запольский, В. В. Образцов. - К.: Тэхніка. - 199.
10. Есин А. М. 1998 Интенсификация процесса обезвоживания осадков городских сточных вод на иловых площадках: дис. канд. техн. наук: 05.23.04 / Есин Анатолий Михайлович. - Харьков. - 146.
11. Орлов В. О. 1989 Интенсификация работы водоочистных сооружений / В. О. Орлов, Б. И. Шевчук. - К.: Будивельник. - 125.
12. Нездойминов В., Чернышев В. 2011 Новая экологически безопасная технология утилизации осадков // MOTROL. Motoryzacia i energetyka rolnictwa. - Volume 13C. - 17 - 23.
13. Пат. № 45077А Україна, МПК⁷ G01N15/25. Спосіб вимірювання швидкості, дзета - потенціалу і розмірів частинок / М. І. Бунін, М. В. Морозов, В. В. Солодов, С. І. Мовчан. - № у 2001042911, заявл. 27.04. 2001, опубл. 15. 03. 2002, Бюл. № 3.
14. Пат. № 50226А Україна, МПК⁷ G01 N15/00. Спосіб вимірювання швидкості і ефективного діаметра частинки / М. В. Морозов, С. І. Мовчан. - № у 2001118059; заявл. 26. 11. 2001; опубл. 15. 10. 2002, Бюл. № 10.
15. Пат. № 9877А Україна, МПК⁷ C02F1/46. Спосіб обробки стічних вод гальванічного виробництва промислових підприємств / С. І. Мовчан. - № у 2005 03515; заявл. 14. 04. 2005, опубл. 17. 10. 2005, Бюл. № 10.
16. Пат. № 34874А Україна, МПК⁷ G 01 N 15 / 00. Спосіб вимірювання ефективного діаметру та концентрації частинок у розчині / М. В. Морозов, С. І. Мовчан. - № у 2008 03869; заявл. 27. 03. 2008, опубл. 26. 08. 2008, Бюл. № 16.
17. Пат. № 45347 Україна, МПК⁷ C 02 F 1 / 46. Спосіб очищення стічних вод гальванічного виробництва / С. І. Мовчан. - № у 2009 04539, заявл. 07. 05. 2009; опубл. 10. 11. 2009, Бюл. № 21.
18. Пат. № 58534 Україна, МПК⁷ G 01 N 15 / 00. Пристрій для вимірювання швидкості частинки домішок в рідині / М. В. Морозов, С. І. Мовчан. - № 2010 14210; заявл. 29. 11. 2010, опубл. 11. 04. 2011, Бюл. № 7.
19. Патент на корисну модель № 64255 Україна, МПК⁷ C 02 F 1 / 46. Спосіб очищення стічних вод гальванічного виробництва комплексом хімічних компонентів / С. І. Мовчан, М. В. Морозов. - № у 2010 132249, заявл. 08. 11. 2010; опубл. 10. 11. 2011, Бюл. № 21.
20. Патент на корисну модель № 79914 Україна, МПК⁷ G 01 N 15 / 00. Спосіб вимірювання швидкості частинки в розчині при електрофорезі / М. В. Морозов, С. М. Епоян, С. І. Мовчан. - № 2012 11 263; заявл. 28. 09. 2012, опубл. 13. 05. 2013, Бюл. № 8.

21. Петросов В. А. 2001 Теоретическое обоснование и разработка методов интенсификации работы систем водообеспечения; дис. доктора техн. наук: 05.23.04 / Петросов Валерий Альбертович. – Харьков. – 320.
22. Повышение эффективности работы сооружений при очистке питьевой воды: монография / С. М. Эпоян, Г. И. Благодарная, С. С. Душкин, В. А. Сташук. – Харьков.: ХНАГХ, 2013. – 190.
23. Реконструкция и интенсификация сооружений водоснабжения и водоотведения: Учебное пособие / А. А. Василенко, П. А. Грабовский, Г. М. Ларкина, А. В. Полищук, В. И. Прогульный. – Киев – Одесса: КНУСА, ОГАСА. – 2007. – 307.
24. Эпоян С.М. 1997 Интенсификация процессов очистки городских сточных вод и обработки осадков; дис. доктора техн. наук: 05.23.04 / Эпоян Степан Михайлович. – Харьков. – 319.

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ КРЫМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Наталия Ветрова

Национальная академия природоохранного и курортного строительства
КНЦ НАН и МОН Украины

Аннотация. Рассмотрены основные тенденции функционирования системы энергоснабжения в Автономной республике Крым за последние 20 лет, сложившаяся структура производства и потребления электроэнергии, проанализированы имеющийся потенциал и уровень использования его на данном этапе. Конкретизированы условия и особенности использования возобновляемых источников энергии с учетом характеристик территории и уровня экономического развития республики. Выявлены направления развития энергетической сферы с учетом использования возобновляемых источников.

Ключевые слова: система энергоснабжения, возобновляемые (альтернативные) источники энергии, ветроэнергетика, энергетика, использующая солнечное излучение, энергетика малых рек, энергетика биомассы.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня в мире пристальное внимание уделяется проблемам экологии, но потребности общества требуют значительных энергетических ресурсов, поэтому согласование образа жизни с экологическими возможностями территории предполагает определение ограничений в эксплуатации природных ресурсов, повышение эффективности их использования, разработки и реализации инновационных решений, согласованных с природными закономерностями, в том числе и в энергетике.

В рамках всестороннего обсуждения проблем жизнеобеспечения на международных экологических конференциях мировое сообщество приняло стратегически верное решение о необходимости перехода к устойчивому развитию с учетом современных технико-технологических разработок по переработке и потреблению ресурсов на национальном и региональных уровнях.

Необходимость более широкого использования в энергетике возобновляемых источников стала очевидной задачей для современной экономики относительно недавно. Это связано, с одной стороны, с ограниченностью не возобновляемых ресурсов, а с другой, с загрязнением природной среды, имеющих негативные последствия, как для экономики, так и для общества. Внедрение новых технологий, систем и установок по использованию альтернативных (возобновляемых) экологически чистых источников энергии, в том числе с сезонным и суточным аккумулярованием тепла, позволит организовать экономически выгодную деятельность. В отношении потребления энергоресурсов, источники производства которых не являются безграничными, рациональная территориальная организация социально-экономической системы должна обеспечивать: соответствие масштабов потребления ресурсов уровню, при котором не снижается экологическая безопасность территории;

формирование совокупных потребностей (для производства и для населения) с учетом эффективного производства и распределения энергии. При этом наиболее перспективным должен быть подход, который способствует расширению в схемах производства энергии использования возобновляемых источников энергии, учитывая региональные характеристики. Решение данных задач предполагает реализацию разработок теории и результатов практики энергосбережения и энергоснабжения с учетом альтернативных (возобновляемых) источников.

Теоретические основы энергетике, которая является многоотраслевой сферой, постоянно развиваются, что отражено во многих научных работах отечественных и зарубежных школ [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Отправными точками, которые способствовали постоянному научному поиску в сфере эффективного производства и потребления энергоресурсов и связанных с ними систем, являются энергетический кризис 70-х годов XX века в развитых странах, катастрофа на Чернобыльской атомной электростанции и повышение культуры природопользования в мире в виду экологической нагрузки, которую формирует энергетика на окружающую среду. При этом ученые подчеркивают возрастание роли возобновляемых источников энергии: через несколько десятков лет их доля в мировом энергетическом балансе может составить по разным оценкам от 18 до 30% [12]. Эти процессы смогут значительно уменьшить неблагоприятные воздействия энергетике на окружающую среду и также наряду с решением экологических проблем, этот переход будет означать значительный прогресс в социальной, экономической и политической сферах.

Завершая краткий анализ научных подходов развития сферы энергетического обеспечения современного общества, можно отметить, что все еще есть много проблем, которые требуют решения в том числе и с учетом

региональных сложившихся схем энергоснабжения.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ

В статье поставлена цель, раскрыть особенности современных направлений совершенствования системы энергоснабжения с использованием возобновляемых источников, которые обеспечивают и энергосбережение, и развитие экологически чистых производств на примере Крымского региона, обеспечение экологической безопасности которого – важная и актуальная проблема с учетом рекреационной специализации полуострова.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

По оценкам специалистов Крым относится к энергодефицитным регионам Украины, поскольку электропотребление составляет около 3,8 млрд. кВтч в год, но за счет собственных источников вырабатывается лишь около 15-17% необходимой энергии. Остальная часть поступает в Крым по межсистемным линиям электропередачи Украины.

Энергопотребление в Крыму за десять лет - с 1990 года до 2000 года, резко снизилось по объему практически в 2 раза (рис. 1) [13].

В последующее десятилетие объемы потребления держались на уровне 300-360 млн. кВтч и изменились по структуре. При этом возросли объемы потребления тепловой энергии и электроэнергии, что связано с технологическими потребностями современного общества (табл.1).

Энергетические мощности развиты в Крыму с учетом имеющихся минерально-сырьевых

и органических источников и сложившихся схем внешних потоков топливно-энергетических ресурсов.

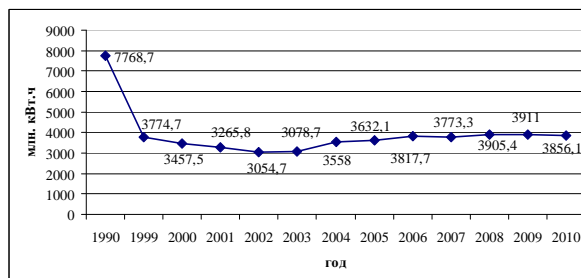


Рис. 1. Динамика потребления электроэнергии в Крыму за 1990-2010 гг.

Fig. 1. Dynamics of consumption of electricity in the Crimea of 1990-2010.

Суммарный объем генерации всех электростанций Крыма составил в 2010 году 780,9 млн. кВтч, а в 2012 году этот показатель составил 1,2 млрд. кВтч электроэнергии, что на 38,5% больше, чем в 2011 году. Это позволило обеспечить собственные потребности в электроэнергии на 20%, хотя на каждого жителя республики приходится около 3,2 тыс. кВтч электроэнергии в год, что значительно ниже уровня который был в СССР - 6 тыс. кВтч, и отмечается в развитых странах мира: в США — 11 тыс. кВтч, в Норвегии — 15 тыс. кВтч в год на одного человека.

Электрическую энергию в Крыму в 90-е годы XX века потребляли промышленность на уровне 25,8% от общего объема, сельское хозяйство – 25,9%, население – около 13,6%, жилищно-коммунальное хозяйство – 5,8% и транспорт – 5,3%, при потерях электроэнергии 11%.

Таблица 1. - Динамика производства электроэнергии в Крыму [13]

Table 1. - Dynamics of production of electricity in the Crimea [13]

	Год										Темп 2010 к 2001 (%)	Темп 2010 к 2005 (%)	
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010			
Все электростанции													
мощность электростанций, тыс. кВтч	400,4	308,7	332,1	335,7	236,6	250,1	243,2	230,2	224,3	235,4	-41,21	-0,5	
произведено электроэнергии, млн. кВтч	340,6	174,4	432,9	472,6	705,4	598,7	714,7	718,3	790,2	780,9	129,2	10,7	
в том числе													
тепловые электростанции													
мощность электростанций, тыс. кВтч	392,9	277,0	287,0	293,7	194,6	191,7	183,8	164,2	145,5	139,0	-64,62	-28,5	
произведено электроэнергии, млн. кВтч	337,1	158,4	408,5	446,5	676,7	571,9	679,3	771,5	847,2	923,01	173,8	36,3	
ветровые электростанции													
мощность электростанций, тыс. кВтч	7,5	31,7	45,1	42,0	42,0	58,4	59,4	70,3	77,7	85,014	1033,5	102,4	
произведено электроэнергии, млн. кВтч	3,5	16,0	24,4	26,1	28,7	26,8	35,4	40,38	44,7	49,043	1301,2	158,6	

Наиболее высокие показатели удельного потребления электроэнергии на единицу стоимости произведенной продукции в этот период имели машиностроение и металлообработка (3,4 кВт·ч /грн.); химия и нефтехимия (3,1 кВт·ч/грн.); производство строительных материалов (3,0 кВт·ч / грн.); металлургия (1,4 кВт·ч /грн).

К 2000 году в Крыму (рис. 1) очень резко снизилось потребление электроэнергии в промышленности - до 30%, хотя данное снижение есть результат сокращения производства, а не обеспечения энергоэффективности производства - значительного снижения удельных расходов электроэнергии на производство продукции добиться не удалось в связи с отсутствием финансирования процессов модернизации и технического перевооружения производства.

Относительно изменений региональной структуры потребления электроэнергии следует отметить, что значительные объемы использует экономика в столице республики, Симферопольском районе, г. Краснопереконск, г. Армянск – зоны развития химической промышленности. Сельскохозяйственные районы сегодня потребляют незначительные объемы электроэнергии, что связано с резким сокращением перерабатывающих агропромышленных предприятий, кроме Красногвардейского и Бахчисарайского районов [12].

Анализ данных о прогнозируемых собственных запасах и добыче энергетических ресурсов на территории Крымского региона [13] позволяет сделать вывод о том, что Крым имеет потенциальные возможности для увеличения собственной добычи нефти и природного газа. В 2012 году добыча природного газа на шельфе Черного и Азовского морей обеспечила потребности потребителей Крыма в голубом топливе на 65%. По сравнению с 2011 годом рост обеспечения составил 12 п.п. Однако для освоения имеющихся ресурсов требуются значительные капитальные вложения с привлечением зарубежных инвесторов, что возможно только в перспективе, а при низкой эффективности использования, извлекаемые запасы природных ресурсов в Крыму могут быть исчерпаны в близкой перспективе. В

связи с этим возникает необходимость выявления возможностей рационального использования топливно-энергетических ресурсов традиционной энергетики, с одной стороны, и разработки, широкого внедрения в Крыму научно-технических разработок и предложений по использованию возобновляемых экологически чистых источников энергии, - с другой стороны.

Необходимость и целесообразность развития направления энергетики с использованием возобновляемых источников энергии в Крыму обусловлены следующими причинами:

- дефицитом традиционных собственных топливно-энергетических ресурсов;
- дисбалансом в развитии энергетического комплекса Украины, который ориентирован на значительное (до 25-30%) производство электроэнергии на атомных электростанциях при фактическом отсутствии производств по получению ядерного топлива, утилизации и переработке отходов;
- благоприятными климато-метеорологическими условиями для использования основных видов возобновляемых источников энергии – энергия ветра, солнца, гидротермальных ресурсов;
- наличием промышленной базы и производственных мощностей для производства всех видов оборудования и материалов для эксплуатации объектов энергетики на возобновляемых источниках, в частности – ветроэнергетики.

В АР Крым имеются практически все основные виды возобновляемых источников энергии (ВИЭ): ветровая энергия, солнечная энергия, геотермальная энергия, энергия биомасса, энергия окружающей среды и энергия малых рек. По оценкам специалистов института возобновляемой энергии НАНУ в пересчете на условное топливо общий годовой технически достижимый энергетический потенциал ВИЭ составляет 6,6 млн. т у.т., что можно соотнести с 5,7 млрд. м³ природного газа. Данный потенциал значительно превышает годовые энергетические потребности республики (табл. 2) [14].

Таблица 2. - Годовой технически достижимый энергетический потенциал ВИЭ в Крыму [14]
Table 2. - Annual technically attainable energy potential of renewable energy in the Crimea [14]

Направления освоения ВИЭ	Годовой технически достижимый энергетический потенциал ВИЭ		Эквивалентные объемы природного газа
	млрд. кВт·ч /год	6 млн. т у.т/год	млрд.м ³ /год
Ветроэнергетика	6,95	3,50	3,04
Солнечная энергетика	1,82	0,38	0,33
Геотермальная энергетика	9,72	1,11	0,96
Биоэнергетика	5,21	0,64	0,56
Гидроэнергетика малых рек	0,14	0,05	0,04
Энергетика окружающей среды	8,00	0,93	0,81
Всего	31,84	6,61	5,74

Рассматривая энергию ветра следует отметить, что в конце XX столетия ветроэнергетика не могла конкурировать с топливными видами генерации по основному экономическому параметру – себестоимости электроэнергии. С начала XXI столетия наметились следующие тенденции:

- устойчивое увеличение стоимости топливной составляющей в себестоимости электроэнергии, произведенной с использованием традиционных источников;
- увеличение мощности производимых ветроэнергетических установок (ВЭУ);
- уменьшение удельной стоимости 1 кВт установленной мощности ветроэнергетических станций (ВЭС) в результате увеличения мощности отдельной ВЭУ;
- снижение эксплуатационных затрат в связи с увеличением мощности отдельной ВЭУ.

Основными направлениями современной ветроэнергетики являются централизованная («большая») ветроэнергетика, базирующаяся на использовании ветроэнергетических станций и автономная («малая»), базирующаяся на использовании единичных ветроагрегатов малой мощности.

Первая ветроэлектростанция была сооружена в Крыму в 1931 году и проработала до 1941 года. Ее мощность составляла 110 кВт. Ветровой энергетический потенциал Крымского полуострова составляет 3700 МВт. Это самый высокий показатель в Украине. В Крыму находятся 7 объектов ветроэнергетики (522 ветроагрегата мощностью 59,8 МВт).

Перспективы развития ветроэнергетики на территории автономии обусловлены благоприятными географическими условиями, к которым относятся стабильные схемы ветрообразования (скорость ветра средняя 5 км/ч, небольшой турбулентности), рельефом местности, который обеспечивает функционирование ветроагрегатов вне зон затенения, а также наличием малопригодных для сельскохозяйственного использования земель и территорий вне природоохранных зон [14].

Выполнение работ по внедрению малой ветроэнергетики в Крыму возможно на основании научно-технических и опытно-конструкторских разработок Украины.

К настоящему времени разработана серия ветроустановок разных мощностей от 0,5 до 100 кВт и разного назначения, которые предназначены для решения следующих целей и задач по экономии традиционных топливно-энергетических ресурсов:

- автономное снабжение электроэнергией потребителей, не связанных с централизованными электрическими сетями (небольших поселков, фермерских хозяйств – ВЭУ мощностью до 20 кВт;

- выработка электроэнергии постоянного тока низкого напряжения;
- отопление и горячее водоснабжение помещений, теплиц и др.;
- энергоснабжение подъема воды из скважин и колодцев;
- энергоснабжение малого орошения и мелиорации;
- энергоснабжение переработки сельскохозяйственной продукции.

Заявлено к реализации 26 инвестиционных проектов по строительству ветроэлектростанций с использованием ветроустановок единичной мощностью 2-3 МВт, общая мощность которых составляет более 6,7 ГВт. Стоимость строительства ВЭС за счет частных инвестиций оценивается порядка 8 млрд. евро.

На территории Крыма целесообразно также использовать значительные ресурсы такого возобновляемого энергетического ресурса как энергия солнечной радиации при освещенности поверхности. Среднегодовое количество суммарной солнечной радиации в регионе достигает 1400 кВт·ч/м² [15]. Инсоляция в разных районах полуострова составляет от 2170 до 2400 часов в год, большая часть из которых приходится на летний сезон, что совпадает с повышенным спросом на горячую воду в рекреационном секторе и агропромышленном комплексе [15]. Высокой является качественная характеристика потоков энергии Солнца – длительность солнечного сияния в течение года и суток, которая влияет на уровень эффективности работы солнечных установок (наиболее эффективно с апреля по октябрь).

В первом квартале 2012 года в эксплуатацию введена еще одна станция мощностью 31,55 МВт в районе с. Митяево Сакского района. Таким образом, общая мощность крымских солнечных электростанций составила 229,5 МВт.

Эффективность преобразовательных энергетических систем следует оценивать относительно параметров деятельности, для которой они разрабатываются и реализуются. Учитывая туристско-рекреационную специализацию значительных зон Крымского региона, в соответствии с наличием в них уникальных природных ресурсов рекреации, сложившейся и развивающейся системы индустрии отдыха, в условиях первостепенного решения проблем экологической безопасности территории, целесообразно внедрение и развитие энергетики с использованием возобновляемых источников в рекреационном комплексе. Внедряются следующие направления преобразования солнечной энергии – теплоснабжение (включая горячее водоснабжение и отопление), производство электроэнергии для хладоснабжения, кондиционирования воздуха, сушки материалов. В Украине производятся все компоненты систем преобразования солнечной

энергии с учетом достижений отечественной и мировой науки и техники (фотопреобразователи, солнечные коллекторы и другие виды оборудования), что создает материальную основу для поступательного внедрения этого вида энергетики.

В целом за счет использования энергии солнца и ветра с начала 2012 года генерация электроэнергии составила 335,0 млн. кВт·ч, что в 5,4 раза больше соответствующего показателя 2011 года (62,4 млн. кВт·ч).

Относительно возможностей развития в Крыму геотермальной энергетики следует отметить, что имеющиеся объемы месторождений геотермальных вод, распространенных в степной части полуострова, позволяют получить значительный экономический и социально-экологический эффект. Наиболее предпочтительными являются три площади Новоселовская, Октябрьская, Северо-Сивашская, температура воды на которых от 45 до 85 °С и в целом теплоэнергетический потенциал термальных вод оценивается в 475 тыс. м³/сут. Целесообразность использования геотермальной энергетики определяется:

- прогнозируемыми объемами ресурсов,
- для разведки и освоения геотермальных месторождений может использоваться существующее оборудование и мощности геологических организаций,
- по показателям экономической эффективности геотермальные установки превосходят топливные,
- являются экологически безопасными.

Учитывая имеющиеся источники и технические параметры оборудования, ожидаемая энергетическая мощность энергогенерирующих установок может достигнуть 152 МВт.

Производство электроэнергии из биомассы сегодня получается в результате либо ее сжигания, либо переработки во вторичное топливо с более высокой теплотворной способностью (газификация, пиролиз). При этом источниками биомассы являются в первую очередь растительный мир, а вторичными – отходы биомассы, которые образуются в производстве и жизнедеятельности. Если учесть объемы твердых бытовых отходов, которые образуются на полуострове, то при их переработке с получением биогаза может быть сэкономлено 0,4 млн. т.у.т. в год [14]. Одной из главных проблем при развитии этого вида энергетики является с одной стороны зависимость от объемов биомассы, получение которой может сильно варьироваться под влиянием внешних факторов, а с другой – необходимостью привлечения значительных инвестиционных и инновационных ресурсов.

Общепризнанным источником энергоснабжения является гидроэнергетика. При этом все более широко используется потенциал малых рек, что часто позволяет решать местные

проблемы наиболее эффективно не только в экономическом плане, но что немало важно – в экологическом. Несмотря на то, что природные водные ресурсы Крыма ограничены, на полуострове в горной части энергия гидропотоков и потенциал водохранилищ позволяет произвести энергетические ресурсы. Потенциал малых рек Крыма используется на объектах водоснабжения, канализации и орошения земель для выработки электроэнергии и снижения до 80% энергетических затрат на собственные нужды. В районе Большой Ялты установлено 5 мини-ГЭС мощностью 92 кВт, выработка которых за 2012 год составила 733 тыс. кВт·ч. Относительно северной части Крыма следует отметить отсутствие потенциальных возможностей развития именно этого вида альтернативной энергетики ввиду отсутствия рек.

Еще одним направлением развития энергоснабжения с использованием альтернативных источников энергии является использование низкопотенциальной теплоты (источниками могут выступать атмосферный воздух, имеющий разность температур на входе и выходе из систем, вода природных водоемов, сбросы систем охлаждения промышленных производств и многие другие объекты с различными температурами, давлением, скоростью движения), поскольку с помощью системы преобразования она может быть эффективно переведена в теплоту для отопления, горячего водоснабжения, как производств, так и социально-бытовых объектов [16]. По расчетам энергетический потенциал окружающей среды значителен, хотя ограниченное его использование в настоящее время в большей степени определяется инерционностью восприятия подходов к решению проблем энергоснабжения общества. Кроме названных тепловых схем, окружающая среда опосредованно может создавать энергопотоки, использование которых может рассматриваться как эффективное потребление энергии. Число примеров и технологических решений неограниченно, но можно привести разработки схем посадки виноградников, обеспечивающих максимальную освещенность лозы солнечными лучами, расположение жилых построек с учетом «розы ветров» для снижения теплопотерь или аккумуляирования тепла в помещении за счет солнечного потока и др.

ВЫВОДЫ

Обобщая представленный материал по теме исследования, следует отметить важность решения проблем энергоснабжения современных общественных систем, в частности Крыма с учетом решения проблем экологической безопасности. Энергоресурсы полуострова многоплановы, особенно это касается возобновляемых ресурсов и в последнее время они активно используются. За 2012 год прирост в электроэнергетике республики составил 28,2%, прежде всего за счет бурного

развития альтернативной электроэнергетики. Однако резервы использованы не в полном объеме и требуются не только технические, но в большей мере организационно-экономические действия и усилия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Одум Г., Одум Э., 1978. Энергетический базис человека и природы – М.: Прогресс. –380.
2. Фаренбрух А., Бьюб Р., 1987. Солнечные элементы: Теория и эксперимент – М.: Энергоатомиздат. – 280.
3. Стребков Д.С., Муругов В.П., 1992. Возможности использования возобновляемых источников энергии // Теплоэнергетика. –№ 4, 27-29.
4. Шпильрайн Э.Э., 1992. Концепция применения солнечной и ветровой энергии в Украине – М.: ИВТАН, – 44.
5. Мельничук М.Д., Дубровін В.О., Красовські Євгеній, Поліщук В.М., 2011. Аналіз сучасного стану і перспектив розвитку світової та української сонячної енергетики // MOTROL. – №13D, 5 –12.
6. Семиноженко В.П., Канило П.М., Остапчук В.Н., Ровенский А.И., 2003. Энергия. Экология. Будущее. — Харьков: Прапор— 464.
7. Мхітарян Н.М., Стогній Б.С., Кудря С.О., Яценко Л.В., 2009. Проблеми науково-технологічного забезпечення та розвитку відновлювальної енергетики в Україні // Відновлювальна енергетика ХХІ століття: 10 ювіл. міжнар. наук.-практ. конф.: матеріали. – Крим, 21-23.
8. Щурчков А.В., Забарний Г.М., Разаков А.М., 2001. Развитие децентрализованого энергопоставления на основе нетрадиционных местных энергоресурсов/ [под ред. Долинского А.А.]. – К.: ИТТ НАН Украины. – 131.
9. Алгоритм формирования региональных программ энергосбережения [Консультативная программа IFC в Европе и Центральной Азии], 2010. – М.: ОАО "Объединение ВНИПИЭнергопром", – 64.
10. Капустенко П.А., Кузин А.К., Макаровский Е.Л., 2004. Альтернативная энергетика и энергосбережение: современное состояние и перспективы: учеб. Пособие – Харьков – 312.
11. Vasil Zhelykh, Bogdan Piznak, Christina Lesik, 2012. The analysis of exergy efficiency evaluation of low-temperature solar collectors // MOTROL. –14№6, 19 –25.
12. Ветрова Н.М., Модель использования возобновляемой энергии в рекреационных учреждениях, 2009 // Солнечная энергетика для устойчивого развития Крыма : науч. издание : кол. авторов – Симферополь, ДОЛЯ, 203-206.
13. Статистичний щорічник Автономної Республіки Крим за 2011 рік, 2012 / за ред.

О.І. Пітюренко. – Симферополь: Головне управління статистики в АР Крим. – 559.

14. Устойчивый Крым. Энергетическая стратегия XXI века, 2001.– Симферополь. – 400.

15. Боков В.А., Черванев И.Г., 2005. Энергетика окружающей среды – Симферополь: ТНУ. – 187.

16. Волков Г.Я., Кочepasов К.Л., 2002. Использование тепловых насосов в теплоснабжении и горячем водоснабжении. – // Энергия и менеджмент. – №2? 14-19.

LINES OF DEVELOPMENT OF POWER SUPPLY SYSTEM OF CRIMEA USING RENEWABLE ENERGY SOURCES

Natalia Vetrova

Summary. The main trends in the functioning of the power supply system in the Autonomous Republic of Crimea for the last 20 years and the existing structure of production and consumption of electricity are examined, the existing potential and the level of its use at the present point in time are analyzed. Conditions and characteristics of the use of renewable energy sources taking into account the characteristics of the territory and the level of economic development of the republic are specified. Lines of development of the energy sector, taking into account the use of renewable sources are identified.

Key words: power system, renewable (alternative) sources of energy, wind power, energy, using solar radiation, energy of small rivers, biomass energy

СОДЕРЖАНИЕ

ВОДОПРОВОДНЫЕ СЕТИ Г. ХАРЬКОВА И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ Дмитрий Гончаренко, Алевтина Алейникова	3
ВЫБОР ФИЛЬТРУЮЩЕЙ ЗАГРУЗКИ ДЛЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ФИЛЬТРОВ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ НАПРАВЛЕНИЕМ ФИЛЬТРАЦИИ Степан Эпоян, Андрей Карагяур, Владимир Паболков	11
УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТА ГАЗОВОГО ЭЖЕКТОРА ДЛЯ СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ Александр Редько, Елена Бабенко	19
ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ Аубекир Найманов, Юлия Гостица	27
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СОРБЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ВОДЫ Андрей Карагяур	35
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СУСПЕНЗИИ В ТОНКОСЛОЙНОМ ЭЛЕМЕНТЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ Степан Эпоян, Александр Сыроватский, Светлана Бабенко	43
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УТИЛИЗАЦИОННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ОРГАНИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ Андрей Редько, Александр Редько, Артём Компан, Сергей Павловский	51
УСИЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТОВ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ЗДАНИЯ Владимир Савйовский, Артем Савйовский	59
ТЕНДЕНЦИИ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ОТОПИТЕЛЬНО- ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ ТЕХНИКИ БУДУЩЕГО Игорь Щекин	67
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРА НА ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ Наталья Куликова, Андрей Редько	77
ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ СТОЧНЫХ ВОД НА ЛОКАЛЬНЫХ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ ОЧИСТНЫХ СОРУЖЕНИЯХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ Степан Эпоян, Ирина Штонда, Юрий Штонда, Сергей Шаляпин, Татьяна Шаляпина, Алексей Зубко	85

СОВРЕМЕННЫЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ РЕШЕНИЯ В ОБРАБОТКЕ СТОЧНЫХ ВОД Александр Смирнов, Валентина Юрченко, Михаил Есин, Андрей Артеменко	93
НАДЕЖНОСТЬ ВОДОВОДОВ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ Валерий Новохатний, Сергей Костенко	101
ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД МЯСОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ Виктор Ковальчук	109
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПРЯМОТОЧНОГО ПАРОВОГО КОТЛА ПРИ ПОДПИТКЕ ВОДОЙ, ПРОШЕДШЕЙ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКУЮ ВОДОПОДГОТОВКУ Александр Лукьянов, Аубекир Найманов, Светлана Антоненко	117
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СТРУКТУРЫ ПОТОКА В СИСТЕМЕ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ЖИДКОСТИ ПОД ВАКУУМОМ Виктор Нездойминов, Виталий Рожков, Надежда Григоренко, Дмитрий Заворотный	125
ИНТЕНСИФИКАЦИЯ СООРУЖЕНИЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД МОЛОКОЗАВОДОВ Степан Эпоян, Станислав Фомин, Ирина Фомина	133
РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЦЕССАХ ВОДОПОДГОТОВКИ НА ТЭС Ирина Чуб, Тамара Айрапетян	141
ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТНО-ЛИВНЕВЫХ СТОЧНЫХ ВОД Степан Эпоян, Сергей Лукашенко, Наталия Гетманец	149
ИНТЕНСИФИКАЦИЯ РАБОТЫ ОБОРОТНЫХ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ Сергей Мовчан	157
НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ КРЫМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ Наталия Ветрова	165

LIST OF THE REVIEWERS

РЕЦЕНЗЕНТ		№ статьи									
Тарадай Александр	д.т.н., профессор	10	7								
Душкин Станислав	д.т.н., профессор	2	5								
Эпоян Степан	д.т.н., профессор	18	13	20	16	15	4	3	12	9	
Валентина Юрченко	д.т.н., профессор	19	14								
Редько Андрей	д.т.н., профессор	6									
Редько Александр	д.т.н., профессор	17	11								
Избаш М.	д.т.н., профессор	8									
Савйовский Владимир	д.т.н., профессор	1									

Editors of the „Motrol” magazine of the Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture would like to inform both the authors and readers that an agreement was signed with the Interdisciplinary Centre for Mathematical and Computational Modelling at the Warsaw University referred to as “ICM”. Therefore, ICM is the owner and operator of the IT system needed to conduct and support a digital scientific library accessible to users via the Internet called the “ICM Internet Platform”, which ensures the safety of development, storage and retrieval of published materials provided to users. ICM is obliged to put all the articles printed in the “Motrol” on the ICM Internet Platform. ICM develops metadata, which are then indexed in the “Agro” database.

Impact factor of the „Motrol” journal according to the Commission of Motorization and Energetics in Agriculture is ()

GUIDELINES FOR AUTHORS (2013)

The journal publishes the original research papers. The papers (min. 8 pages) should not exceed 12 pages including tables and figures. Acceptance of papers for publication is based on two independent reviews commissioned by the Editor.

Authors are asked to transfer to the Publisher the copyright of their articles as well as written permissions for reproduction of figures and tables from unpublished or copyrighted materials.

Articles should be submitted electronically to the Editor and fulfill the following formal requirements:

- Clear and grammatically correct script in English,
- Format of popular Windows text editors (A4 size, 12 points Times New Roman font, single interline, left and right margin of 2,5 cm),
- Every page of the paper including the title page, text, references, tables and figures should be numbered
- SI units should be used

Please organize the script in the following order (without subtitles):

Title, Author(s) name (s), Affiliations, Full postal addresses, Corresponding author's e-mail

Abstract (up to 200 words), Keywords (up to 5 words), Introduction, Materials and Methods, Results, Discussion (a combined Results and Discussion section can also be appropriate), Conclusions (numbered), References, Tables, Figures and their captions

Note that the following should be observed:

An informative and concise title; Abstract without any undefined abbreviations or unspecified references; No nomenclature (all explanations placed in the text); References cited by the numbered system (max 5 items in one place); Tables and figures (without frames) placed out of the text (after References) and figures additionally prepared in the graphical file format jpg or cdr.

Make sure that the tables do not exceed the printed area of the page. Number them according to their sequence in the text. References to all the tables must be in the text. Do not use vertical lines to separate columns. Capitalize the word 'table' when used with a number, e.g. (Table1).

Number the figures according to their sequence in the text. Identify them at the bottom of line drawings by their number and the name of the author. Special attention should be paid to the lettering of figures – the size of lettering must be big enough to allow reduction (even 10 times). Begin the description of figures with a capital letter and observe the following order, e.g. Time(s), Moisture (% , vol), (% , m³m⁻³) or (% , gg⁻¹), Thermal conductivity (W m⁻¹K⁻¹).

Type the captions to all figures on a separate sheet at the end of the manuscript.

Give all the explanations in the figure caption. Drawn text in the figures should be kept to a minimum. Capitalize and abbreviate 'figure' when it is used with a number, e.g. (Fig. 1).

Colour figures will not be printed.

Make sure that the reference list contains about 30 items. It should be numbered serially and arranged alphabetically by the name of the first author and then others, e.g.

7. Kasaja O., Azarevich G. and Bannel A.N. 2009. Econometric Analysis of Banking Financial Results in Poland. *Journal of Academy of Business and Economics (JABE)*, Vol. IV. Nr 1, 202–210.

References cited in the text should be given in parentheses and include a number e.g. [7].

Any item in the References list that is not in English, French or German should be marked, e.g. (in Italian), (in Polish).

Leave ample space around equations. Subscripts and superscripts have to be clear. Equations should be numbered serially on the right-hand side in parentheses. Capitalize and abbreviate 'equation' when it is used with a number, e.g. Eq. (1). Spell out when it begins a sentence. Symbols for physical quantities in formulae and in the text must be in italics. Algebraic symbols are printed in upright type.

Acknowledgements will be printed after a written permission is sent (by the regular post, on paper) from persons or heads of institutions mentioned by name.