

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. 16, No 6

LUBLIN – RZESZÓW 2014

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: *Ilya Nikolenko*, Simferopol, *Janusz Wojdalski*, Warszawa
4. Land management, urban planning, architecture and geodesy: *Karol Noga*, Kraków, *Roman Kadaj*, Rzeszów, *Michał Proksa*, Rzeszów, *Lech Lichotaj*, Rzeszów
5. Mathematical, statistics: *Andrzej Kornacki*, Lublin, *Rostislav Bun*, Lviv

Editorial Board

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

All the scientific articles received positive evaluations by independent reviewers

Linguistic consultant: *Stepan Epoyan*

Typeset: *Elena Babenko*

Cover design: *Hanna Krasowska-Kołodziej*

Photo on the cover: *Konstantin Dumenko*

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 2014

© Copyright by University of Engineering and Economics in Rzeszów 2014

In co-operation with Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture 2014

Edition 150+16 egz.

ОСОБЕННОСТИ ВОЗВЕДЕНИЯ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ НА ДЕЙСТВУЮЩИХ СЕТЯХ ВОДООТВЕДЕНИЯ

Дмитрий Гончаренко, Дмитрий Олейник, Виталий Кайдалов

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

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

E-mail: oliynukdmuro@mail.ru

Аннотация: В статье описана технология возведения железобетонных шахтных стволов глубокого заложения над действующими канализационными коллекторами. Также рассмотрены вопросы коррозионной стойкости конструкций в условиях среды водоотведения и определения горизонтального давления грунта.

Ключевые слова: водоотведение, опускной колодец, полимербетон, полиэтилен, давление грунта.

ВВЕДЕНИЕ

Строительство структуры канализационной сети связано со значительными затратами, 25% из которых составляют расходы на сооружение смотровых шахт.

Большинство шахт г. Харькова было построено в 1970-1980 годы — в период, когда отсутствовали нормативы по количеству стволов на определенную длину коллектора. Позже эта величина была все же регламентирована СНиП 2.04.03-85. Поэтому, а также учитывая тот факт, что в г. Харькове существует 54 км коллекторов глубокого заложения, на сегодняшний день необходимо возведение дополнительных 70 стволов [3].

Процесс работ по устройству и проектированию данных сооружений связан, прежде всего, с правильным выбором конструктивного решения, технологии возведения и определением горизонтального давления грунта. Необходимость строительства сооружения над действующим коллектором в условиях безостановочного пропуска сточных вод, и наличие агрессивной эксплуатационной среды, усложняет задачу проектировщика. Влияние значительной глубины заложения также накладывает дополнительные требования, как на конструктивные, так и на эксплуатационные особенности шахтных стволов.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исходя из того, что срок службы системы канализации должен составлять не менее 50 лет, к смотровым шахтам предъявляются следующие требования, обеспечивающие надежность и долговечность стволов: прочность конструкции, герметичность, стойкость к коррозии, небольшие затраты на техническое обслуживание и возможность инспектирования, гибкость системы, простота возведения, безопасность эксплуатации, взаимозаменяемость отдельных частей внутри системы [7].

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Работы по проектированию ствола начинаются с разработки расчетной схемы и сбора

нагрузок на нее. Выбор расчетной схемы зависит от конструктивных особенностей проектируемого шахтного ствола, а основная часть нагрузок создается давлением грунтового массива.

Нами были рассмотрены различные способы определения давления грунта на подземные сооружения. В конечном итоге мы пришли к выводу о целесообразности применения двух решений: И.Я. Лучковского и В.Г. Березанцева (СНиП 2.09.03-85 «Сооружения промышленных предприятий») с учетом некоторых особенностей. Исследования показали, что метод, описанный в действующем СНиП 2.09.03-85 «Сооружения промышленных предприятий» не всегда применим для расчета шахтных стволов глубокого заложения [13,14].

В грунтах с невысоким углом внутреннего трения ϕ (глинистые грунты), расчетные значения давлений, полученные по решениям СНиП 2.09.03-85 «Сооружения промышленных предприятий» и И.Я. Лучковского, имеют незначительные отличия, поэтому, в равной степени могут быть использованы при возведении вертикальных стволов глубокого заложения. При расчете горизонтального давления в песчаных и супесчаных грунтах, рекомендовано использование решения И.Я. Лучковского, позволяющего с большей точностью определить расчетные нагрузки.

Неверное определение расчетных сил по решению СНиП может служить причиной неконтролируемого опускания колодца, и как следствие – повреждению находящегося под ним сооружения. Данный вывод особенно актуален при расчете сооружений значительной глубины заложения, так как по решению И.Я. Лучковского давление грунта при $\phi > 25^\circ$ с глубиной уменьшается (рис.1) и стремится к нулю, что согласуется с данными натурных наблюдений за глубокими шахтными стволами [8].

Значение давления грунта согласно решения И.Я. Лучковского определяются по одной из формул:

$$\begin{cases} \sigma = \gamma b \lambda_{\gamma} + q \lambda_q - 2ck \sqrt{\lambda_a} \\ \sigma = \gamma h \lambda_{a\gamma} + q \lambda_q - 2ck \sqrt{\lambda_a}, \end{cases} \quad (1)$$

$$\lambda_a = tg^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (2)$$

где: λ_y , λ_{ay} , λ_q – коэффициенты бокового давления, зависящие от соотношения h/b и углов φ и φ_0 . Для упрощения расчетов, значение коэффициентов бокового давления находятся по графикам исходя из соотношения глубины подземного сооружения к его ширине (рис. 1-3) [13].

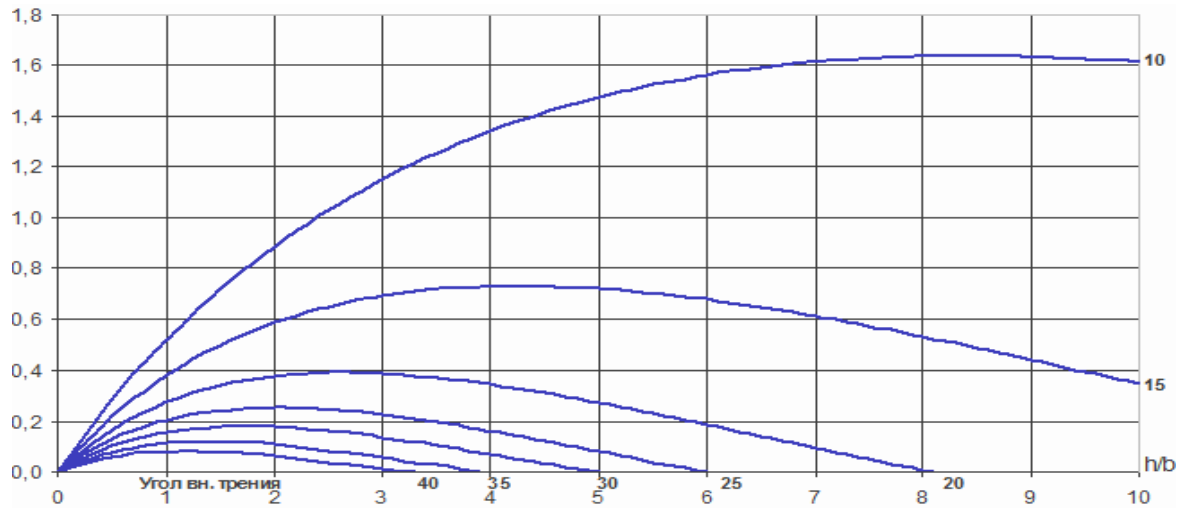


Рис. 1. Коэффициент бокового давления грунта $\lambda_\gamma(\varphi_0=\varphi)$

Fig. 1. Lateral soil pressure coefficient $\lambda_\gamma(\varphi_0=\varphi)$

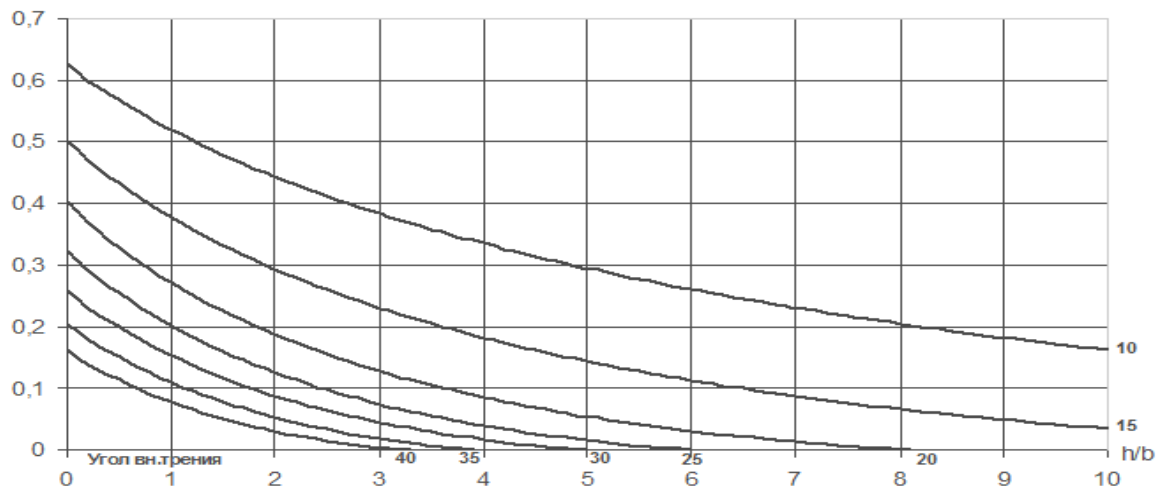


Рис. 2. Коэффициент бокового давления грунта $\lambda_q(\varphi_0=\varphi)$

Fig. 2. Lateral soil pressure coefficient $\lambda_q(\varphi_0=\varphi)$

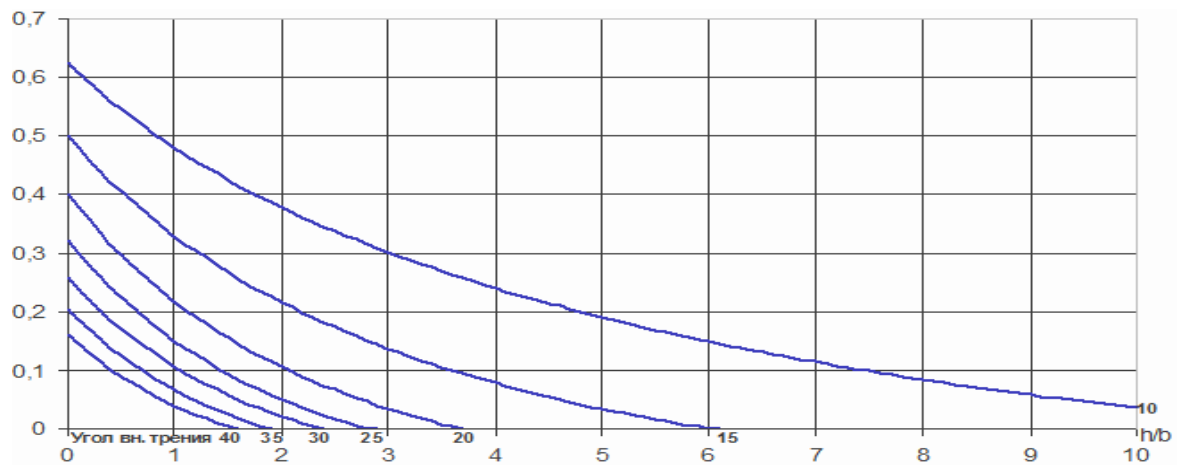


Рис. 3. Коэффициент бокового давления грунта $\lambda_{ay}(\varphi_0=\varphi)$

Fig. 3. Lateral soil pressure coefficient $\lambda_{ay}(\varphi_0=\varphi)$

Согласно решению В.Г. Березанцева давление грунта при достижении максимума (при соотношении $z/r \geq 5$ [18]), стремиться к постоянной величине. Следовательно, разница между фактическим и расчетным сопротивлением грунта с глубиной заложения возрастает, что увеличивает вероятность самопроизвольного опускания.

Конструктивные решения стволов, возводимых над канализационными коллекторами, определяются их функциональным назначением, физико-механическими свойствами окружающего грунтового массива, методами возведения, особенностями работы в эксплуатационный период и применяемыми материалами (рис.4).

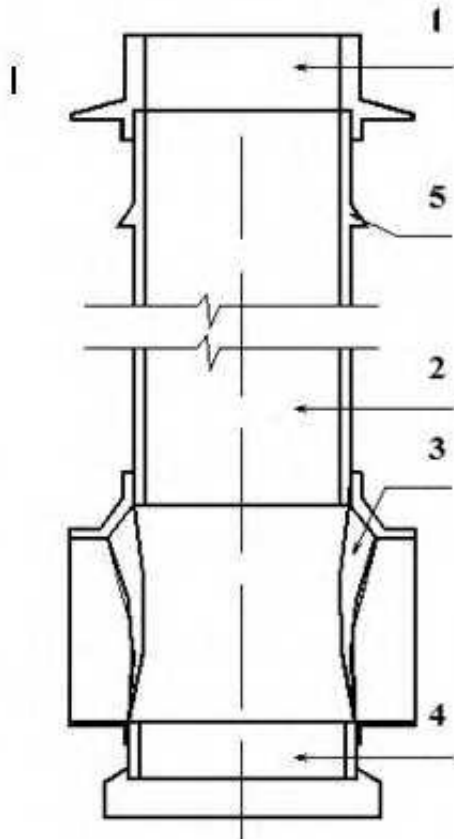


Рис. 4. Конструкция шахтного ствола
1-оголовок; 2- вертикальная (протяженная) часть;
3- сопряжение ствола с горизонтальной выработкой;
4-днище; 5-опорный венец

Fig. 4. Construction mine shaft
1-headroom; 2 - vertical (extended) part; 3 - pair trunk
with horizontal elaboration; 4-bottom; 5-bearing crown

В плане стволы глубокого заложения должны иметь форму круга, это повышает устойчивость и жесткость стен [11].

Шахтные стволы изготавливаются, как правило, из железобетона. Это объясняется доступностью и дешевизной данного материала, а также хорошими физико-механическими характеристиками. Но железобетон в достаточно

сильной мере подвержен деструктивным процессам, протекающим в условиях среды водоотведения (при $pH=1$ скорость коррозии достигает 10 мм/год и более [2]). Поэтому, на элементах сетей водоотведения, подверженных деструктивным процессам, устраивается вторичная защита, позволяющая устранить данный недостаток железобетона.

В качестве коррозионностойкой облицовки рекомендовано использовать полимербетонные или железобетонные панели-оболочки, предварительно изготовленные в заводских условиях. Исходя из необходимости транспортировки полимербетонных панелей на строительный участок, оболочки изготавливаются двух видов: с горизонтальным членением звеньев при диаметре шахты до 3м, и с дополнительным разделением на вертикальные сегменты при диаметре $d > 3$ м. Для улучшения сцепления с бетоном наружная поверхность изготавливается шероховатой и имеет выпуски

Конструкция облицовок диаметром больше 3м осуществляется по типу по типу сборных оболочек ВНИИГС [17] (рис. 5, б), которые состоят из элементов большой длины (до 16 м) и отличаются продольным членением звеньев, это позволяет после сборки получить небольшую протяженность швов (рис. 5). Оболочки собираются в модули и монтируются в проектное положение. В силу достаточно высоких требований к качеству изделий, оболочки производятся в заводских условиях.

В предложенных конструкциях стволов роль несущей оболочки выполняет монолитная железобетонная крепь, что позволяет получить за счет отсутствия стыковых соединений более герметичную конструкцию по сравнению со сборным железобетоном (рис.5).

Наибольшей стойкостью к сильноагрессивным средам обладают изделия, изготовленные из полимерных материалов. Среди полимеров, рекомендованных для устройства вторичной защиты, следует выделить полимербетон и полиэтилен [2].

С использованием ребристого полиэтилена, выполнен ремонт более десяти шахт на территории г. Харькова [3,4,5] (рис. 6). С применением полимербетона выполнен ремонт элементов канализационной сети в г. Москва [15]. Опыт эксплуатации данных материалов в условиях сильноагрессивной среды водоотведения позволяет сделать вывод об их значительной надежности и долговечности.

Анализ различных технологий возведения подземных сооружений в рассматриваемых условиях показывает, что наиболее оптимальным с точки зрения наличия факторов ограничений и универсальности являются стволы комбинированного типа, сооружаемые методом опускного колодца в тиксотропной рубашке с последующим подращиванием (табл.1) [9,13,20].

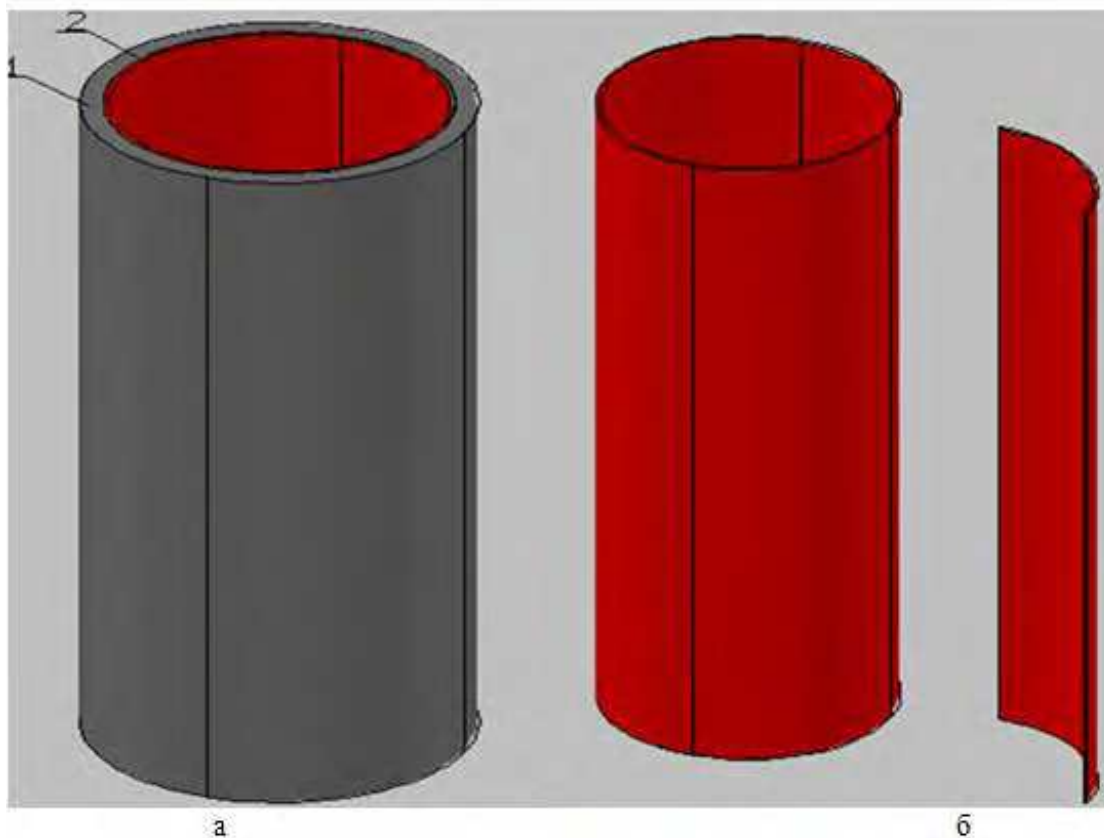


Рис.5. Конструктивные элементы коррозионностойкого шахтного ствола: а) схема размещения коррозионностойкого покрытия шахты: 1-коррозионностоякая облицовка; 2-несущая конструкция из монолитного железобетона. б) конструкция коррозионностойкой облицовки

Fig. 5. Structural elements of corrosion mine shaft: a) the layout of a corrosion-resistant coating of mine: 1-resistant to the corrosive cladding; 2-bearing structure of reinforced concrete. b) corrosion-resistant cladding construction

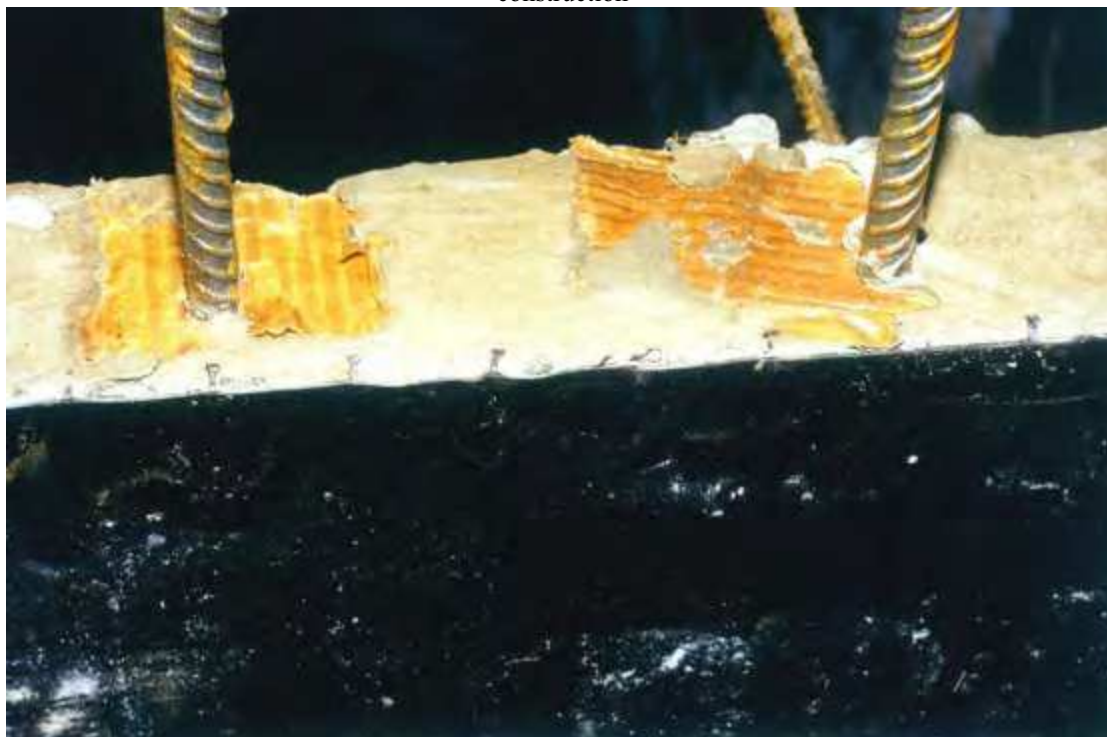


Рис. 6. Железобетонная панель, облицованная полиэтиленом

Fig. 6. Concrete panel, faced with polyethylene

Таблица 1. Сравнение конструктивно-технологических решений стволов по факторам ограничений [13].
Table 1. Comparison of structural and technological solutions shafts restrictions on factors [13].

Факторы ограничений	Конструктивно - технологические решения			
	Открытый котлован	"Стена в грунте"	Опускные сооружения в тиксотропной рубашке	Подрачивание
Глубина заложения:	о	*	*	*
– 10-15м	-	*	*	о
– более 7м	-	*	*	*
– 15-30м	-	о	*	*
Площадь:		о	*	*
– 10-15 м ²	-	о	*	*
– 25-70 м ²	о	*	*	о
– 70-100 м ²	*			
Сложные инженерно-геологические условия	-	-	*	о
Сложные гидрогеологические условия	-	-	*	*
Отсутствие специальных машин и механизмов	о	-	*	*
Возведение в зимних условиях	о	о	о	*
Пересечение коммуникаций	о	-	-	*
Применение малогабаритных элементов	о	-	*	*
Плотная застройка городов и промплощадок	-	*	*	*
Отсутствие первичного крепления	-	*	*	о
Получение высокопрочного водонепрониц. бетона	о	-	*	о

Условные обозначения: * - рекомендуется; о - применение ограничено; - - не рекомендуется.

Рациональные конструктивные решения стволов, принятые с учетом преимуществ погружения опускных сооружений в тиксотропной рубашке и устройства антикоррозионной защиты приведены на рис. 7.

Работы по возведению шахты начинаются с разработки котлована, подсыпки песчаного основания и установки подкладок. После этого изготавливают монолитную конструкцию ножевой части.

Затем устанавливают заранее собранный модуль коррозионностойкой оболочки. После набора бетоном опалубочной прочности опалубку снимают и возводят следующий ярус. Высота яруса подбирается индивидуально для каждого конкретного случая и должна соответствовать размерам монтируемого модуля.

Поскольку погружение колодца в грунт выполняется после достижения бетоном первого яруса и ножевой части 100% проектной прочности, а последующими ярусами бетонирования не менее 75%, то для снижения сроков строительства

применяются добавки, ускоряющие процесс твердения бетона. Благодаря применению данных добавок, процесс погружения колодца возможно производить после достижения бетоном возраста 7 суток.

В процессе производства работ необходимо обеспечивать тщательное вибрирование бетонной смеси, непосредственно примыкающей к панелям-оболочкам, применять малоусадочные цементы для приготовления бетона, тщательно соблюдать заданную технологию изготовления и режим пропаривания плит-оболочек, соблюдать правила перевозки, хранения и монтажа, а также обеспечивать надежную заделку швов между плитами-оболочками.

До начала погружения оболочки устраивают форшахту, заполняя ее глинистым раствором, уровень которого должен не менее чем на 1 м превышать уровень поверхности земли. Это делается для того, чтобы предотвратить обрушение грунта в верхней части тиксотропной рубашки. Также форшахта-воротник обеспечивает

фиксируемое положение колодца при погружении и препятствует неконтролируемому опусканию колодца. После заполнения форшахты глинистым раствором колодец снимают с подкладок.

Выемку грунта в виду преимущественно малых диаметров шахт следует производить

грейфером при глубине забоя, не превышающей 50-70 см по диаметрально противоположным зонам [19] (рис.8). Время на погружение обычно составляет 60-70% всего времени строительства, темп погружения колеблется от 0,2 до 1,0 м/сутки [16].

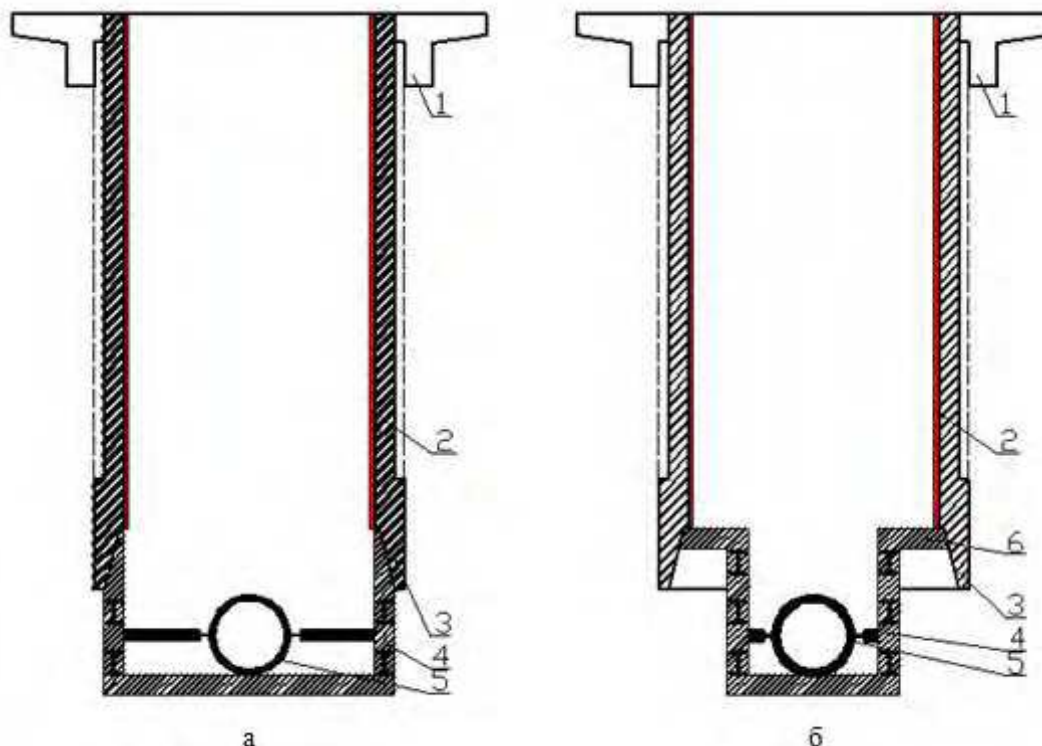


Рис. 7. Конструкция стволов типа «опускная крепь в тиксотропной рубашке-подращивание»: а) с опорным венцом за счет уширения банкетки ножа; б) с опорным венцом в виде переходной плиты: 1 - форшахта-воротник; 2 – антикоррозионная облицовка; 3 - конструкции ножевой части опускного колодца; 4 - колодец, пройденный подращиванием; 5 -существующий коллектор в металлическом каркасе; 6 – переходная плита
Fig. 7. Construction shafts like "Surge lining in thixotropic shirt-rearing": a) with the support rim by broadening banquettes knife; b) with the support rim as the adapter plate: 1 - shaft-collar; 2 - anticorrosive lining; 3 - the design of the blade sunk well; 4 - well, passed rearing; 5-existing collector metal frame; 6 - adapter plate

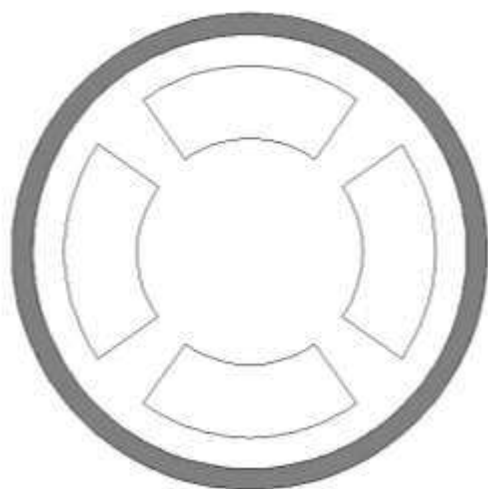


Рис. 8. Разработка грунта при погружении опускного колодца

Fig. 8. Excavation of soil by immersion caisson

Работы следует производить при искусственном водопонижении. Игольчатые фильтры следует располагать на расстоянии от полости тиксотропной рубашки не менее 1,5м, так как особенно в крупнопористых грунтах невозможна откачка тиксотропного раствора игольчатыми фильтрами через грунт. Во избежание прорыва тиксотропного раствора под нож, на уступе ножевой части колодца устраивается глиняный замок или закрепляется уплотнитель из специальной пористой резины [19].

В виду того, что ножевая часть колодцев в тиксотропных рубашках имеет незначительную высоту по сравнению с вышерасположенной частью стен, эти колодцы обладают повышенной чувствительностью к разработке грунта в отношении возникновения кренов, которые часто направленные и величину. Разработка грунта должна производиться диаметрально расположенными захватками с оставлением фиксированных зон (рис.5). Отсутствие контакта стен с грунтом в зоне

тиксотропной рубашки, обуславливает тенденцию опускных сооружений к часто возникающим кренам, в то же время является причиной их легкого и быстрого исправления [19].

Устройство узла соединения с конструкцией коллектора, как уже было отмечено выше, производят способом подрачивания. Котлован разрабатывают с вертикальным откосом по номинальным габаритам наружной поверхности ограждающих стен сооружения. Непосредственно вслед за разработкой грунта производят монтаж стен сооружения из железобетонных тубингов. Монтаж ведется сверху вниз. Пространство между наружной поверхностью ограждающих стен и грунтом тампонируют бетоном или цементным раствором. После устройства узла соединения производят защиту бетонных конструкций полимербетонными панелями либо панелями, облицованными полиэтиленом.

Гидроизоляцию шахтного ствола рекомендовано производить после его погружения, так как существует риск ее повреждения во время опускания колодца. Поэтому производят замещение глинистого раствора цементно-песчаным, который через шланги или инъекционные трубы закачивается сначала в нижнюю зону полости тиксотропной рубашки, а затем выше, по мере заполнения полости тампонажным раствором. Глинистый раствор будучи в большинстве случаев приблизительно в два раза легче цементно-песчаного, вытесняется вверх полости тиксотропной рубашки и отводится в сторону от колодца. Смещение глинистого раствора с цементно-песчаным не происходит. Для успешной прокачки по шлангам и трубам тампонажный раствор должен обладать достаточной пластичностью, поэтому приготавливают «жирный» раствор (состава 1:2 и даже 1:1). Также применяют различные добавки. Для гарантии получения достаточно удовлетворительной монолитности тампонажный раствор следует закачивать в полость тиксотропной рубашки одновременно в нескольких точках, причем непрерывно до заполнения полости на требуемую высоту [19].

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показывают, что на действующих коллекторах города Харькова необходимо возведение дополнительных 70 шахт.

В грунтах с невысоким углом внутреннего трения расчетные значения давлений, полученные по решениям В.Г. Березанцева и И.Я. Лучковского, имеют незначительные отличия и могут быть использованы в равной степени при возведении стволов глубокого заложения. Решение И.Я. Лучковского необходимо применять при расчете опускных колодцев с углом внутреннего трения $\phi > 25$.

Наиболее рациональным методом возведения шахт над действующими сетями водоотведения

является комбинация способов опускного колодца в тиксотропной рубашке и подрачивания

В силу агрессивности эксплуатационной среды железобетонные конструкции сетей водоотведения нуждаются в дополнительной защите. Наибольший эффект в данном направлении можно получить благодаря применению полимербетона а полиэтилена.

Строительство смотровых шахт систем водоотведения наиболее оправдано при сочетании несущей железобетонной конструкции с устройством дополнительной антикоррозионной защиты.

Данная методика сооружения сборно-монолитных колодцев с использованием коррозионностойких оболочек-панелей позволяет возводить шахтные стволы, которые соответствуют предъявляемым к ним требованиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович И., 2005. Сети и сооружения водоотведения. Расчет, проектирование, эксплуатация / И. Абрамович.- Харьков: Глобус.-288 .
2. Ахмадулин Р., 2006. Повышение долговечности железобетона в условиях сероводородной коррозии: дис. ... кандидата техн. наук: 05.23.05 / Ахмадулин Рихат. - Уфа., - 147 .
3. Гончаренко Д., 2013. Исследование технологий возведения смотровых шахт над действующими канализационными коллекторами / Д. Гончаренко, Д. Олейник // Містобудування та територіальне планування: Наук.-техн. збірник. – К., КНУБА, – Вип. 48. - 115-118.
4. Гончаренко Д., 2013. Выбор материалов для защиты от коррозии конструкций шахтных стволов систем водоотведения / Д. Гончаренко, Д. Олейник // Науковий вісник ХНУБА. - №73. – 107-112.
5. Гончаренко Д., 1997. Полиэтиленовая облицовка шахтных стволов при их реконструкции / Д. Гончаренко, В. Воблых, И. Коринько, Г. Санков // Коммунальное хозяйство городов: Респ.межвед. н-техн. сб.- №12. - 4-9.
6. Гончаренко Д., 1997. Стан облицювання шахтних стволів канлізаційних колекторів і способи їх ремонту / Д. Гончаренко, І. Корінько, Г. Санков // Будівництво України. - № 12. – 10-12.
7. Гончаренко Д., 2008. Эксплуатация, ремонт и восстановление сетей водоотведения: Монография / Гончаренко Д. - Харьков: Консум,. – 400.
8. Давыдов С. Расчет и проектирование подземных сооружений / С. Давыдов. – М.: Стройиздат. – 376 .
9. Даховски Рышард, 2005 Технология сооружения опускных колодцев в стесненных условиях: дисс. ... доктора техн. наук: 05.23.08 / Даховски Рышард. - Санкт-Петербург. – 316.

10. Ивахнюк В., 1999. Строительство и проектирование подземных и заглубленных сооружений / В. Ивахнюк. – М.: Издательство АСВ, – 299.
11. Манец И., 2010. Техническое обслуживание и ремонт шахтных стволов: в 2 т. / Манец И., Грядущий Б., Левит В.; под общ. ред. д-ра техн. наук Сторчака С.- 4-е изд., перераб. и доп., - Донецк. Юго-Восток. - Т.1 – 409.
12. Климов В., 1975. Строительство опускных колодцев. Изд. 2-е, перераб и доп. / В. Климов, В. Маричев. - М., Стройиздат.– 174 с.
13. Никитенко В., 2004. Железобетонные стволы комбинированного типа, возводимые над действующими канализационными коллекторами: дисс. ... канд. техн. Наук : 05.23.01 / Никитенко Вениамин. – Харьков. - 234 .
14. Олейник Д., 2014. Анализ решений по определению горизонтального давления грунта на опускные колодцы на примере реального объекта / Д.Олейник // Науковий вісник будівництва ХНУБА. - №1 (75). – 212-216.
15. Пахомов А., 2008. Современные технологии и оборудование для модернизации сетей и сооружений канализации / А. Пахомов, К. Хренов, М. Богмолов, Т. Дудченко, А. Пронин // Водоснабжение и санитарная техника. - № 10.– 8-17.
16. Проектирование опускных колодцев сооружений водопроводно-канализационного хозяйства. Методические указания и рекомендации по курсовому и дипломному проектированию для специальности "Водоснабжение и канализация". Часть I / Г. Шишканов, В. Попова. - Красноярск, красноярский политехнический институт, 1975, 62. Сборные железобетонные колодцы-оболочки типа ВНИИГС. Всесоюзный научно-технический институт гидротехнических и санитарно-технических работ ВНИИГС. - Центральное бюро технической информации. – М., 1961.
17. Сооружения промышленных предприятий СНиП 2.09.03-85
18. Тер-Галустов С., 1970. Опускные сооружения в тиксотропных рубашках / С. Тер-Галустов, В. Иванов. - М., Стройиздат.– 106 .
19. Dachowski R. Aspekty techniczno-ekonomiczne wykonawstwa obiektow podziemnych / Dachowski R. // Konferencja Naukowo-Techniczna Inzynieria Procesow Budowlanych. - Bydgoszcz, 199. - №7. - S. 389-392.
20. Raymond W. M. Chan. Report on Concrete Admixtures for Waterproofing Construction / Raymond W. M. Chan, Peter N. L. Ho, Eric P. W. Chan. - Structural Engineering Branch. Architectural Services Department. - 1999. - 38 pages.
21. Saliev E. Reliability of The Functioning of The Water Supply and Sewerage System / Enver Saliev // MOTROL. — Commission of motorization and energetics in agriculture : Polish Academy of sciences. — Lublin, 2013. — Vol. 15, № 5. — P. 53—60.

FEATURES ERECTION OF CORROSION MINE SHAFTS DEEP FOUNDATIONS ON EXISTING NETWORKS OF WATER REMOVALS

Summary. The article describes the technology of construction of concrete shafts deep foundation over existing sewer. Also discuss issues the corrosion resistance of structures within the environment sewerage and determine soil pressure.

Key words: drainage, caisson, polymer concrete, polyethylene, soil pressure.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АКТИВИРОВАНИЯ РАСТВОРОВ КОАГУЛЯНТА СУЛЬФАТА АЛЮМИНИЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ

Степан Эпоян, Станислав Душкин¹, Тамара Айрапетян²

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

2. Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова
Адрес: Украина, г. Харьков, ул. Революции, 12
E-mail: tamara78kh2008@rambler.ru

Аннотация. Рассматриваются теоретические основы влияния активированного раствора коагулянта сульфата алюминия, используемого при подготовке питьевой воды. Приведены теоретические предпосылки, объясняющие механизм повышения эффективности работы водопроводных сооружений при подготовке питьевой воды с применением активированного раствора коагулянта сульфата алюминия.

Ключевые слова: подготовка питьевой воды, активированные растворы, электрокинетический потенциал, адсорбционная емкость, интенсификация процессов очистки воды.

ВВЕДЕНИЕ

Для очистки воды поверхностных источников водоснабжения, которые обеспечивают водой около 75% населения Украины, от грубодисперсных, коллоидных и других загрязнений, наибольшее распространение получила физико-химическая технология, в которой процессы отстаивания и фильтрования являются важными элементами систем водоснабжения при подготовке питьевой воды [4,9,13].

Анализ существующих методов улучшения эффективности работы очистных сооружений при подготовке питьевой воды свидетельствует о том, что наиболее перспективными являются методы, связанные с модернизацией существующих и разработкой новых методов и конструкций водоочистных аппаратов.

Одним из наиболее распространенных методов очистки воды от грубо-дисперсных и коллоидных загрязнений является метод обработки воды коагулянтами, однако этот метод требует усовершенствования, а именно: повышение скорости формирования и выпадения коагулированной взвеси в осадок. Недостатком данного метода является значительный расход реагентов при неблагоприятных условиях коагуляции: недостаточная щелочность, высокая цветность воды и низкая температура воды, осветляемой в осенне-зимний период года [6,10].

Рассматриваемый в данной статье метод повышения эффективности работы очистных сооружений водопровода посредством использования активированного раствора реагента сульфата алюминия позволяет снизить расход реагентов, улучшить качество очистки воды, увеличить производительность очистных сооружений. Поэтому изучение особенностей

процесса, влияния различных факторов на качество очистки природных вод, научное обоснование и разработка выбора технологического режима активации раствора коагулянта сульфата алюминия для повышения эффективности работы очистных сооружений является актуальной задачей [1,3].

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

В настоящее время особое внимание уделяется интенсификации процесса очистки природных и сточных вод, совершенствованию технологии и разработке новых эффективных методов очистки, что позволит упростить существующую технологию обработки воды, сократить трудоемкие процессы приготовления и дозирования реагентов, уменьшить затраты на эксплуатацию очистных сооружений, увеличить их производительность, повысить качество и уменьшить себестоимость очищенной воды [2,5,18].

Известно много методов и способов, применяемых для улучшения физико-химических условий водообработки. Среди них наиболее распространены методы, связанные с использованием рациональных технологически обоснованных схем, модернизацией существующих и разработкой новых конструкций водоочистных аппаратов, внедрение которых в практику водоподготовки не всегда возможно по техническим, экономическим и другим причинам (приготовление и дозирование химических реагентов требует специального оборудования, необходимы дополнительные площади, а иногда и дополнительный обслуживающий персонал и т.д.) [17,19].

Обработка воды активированным раствором коагулянта позволяет увеличить гидравлическую

крупность коагулированной взвеси. Наиболее сильное влияние активированный раствор коагулянта оказывает на гидравлическую крупность взвеси 0,2мм/с и меньше, т.е. на наиболее мелкую и трудноудаляемую взвесь, что создает условия для более интенсивного осаждения ее в отстойниках и повышения качества осветления воды, подаваемой на скорые фильтры [20].

Установлено, что эффективность осветления воды при использовании активированных растворов коагулянтов сульфата алюминия зависит в значительной степени от параметров активации: напряженности магнитного поля и содержания в растворе анодно-растворенного железа, оптимальные значения которых зависят, прежде всего, от качественных показателей осветляемой воды [21,22].

Обработку воды активированным раствором коагулянта целесообразно выполнять при содержании в осветляемой воде взвешенных веществ до 100-250мг/дм³. Цветность осветляемой воды при обработке активированным раствором коагулянта сульфата алюминия не зависит от содержания взвешенных веществ и в 1,5-1,6 раза ниже цветности при использовании обычного раствора коагулянта [23].

Выполненные исследования показывают, что использование активированного раствора коагулянта сульфата алюминия при очистке воды позволяет снизить остаточное содержание алюминия в осветленной воде в среднем на 45-50% и этим самым повысить экологическую безопасность воды [7].

Применение в процессе очистки воды активированных растворов коагулянтов позволяет снизить дозы реагентов, используемых при очистке воды в среднем на 30% (сульфат алюминия) без ухудшения качества фильтрата, увеличить пропускную способность фильтров в среднем на 40%, что позволяет повысить эффективность работы всей системы очистных сооружений в целом [24].

Результаты исследований использованы при разработке технологической документации для промышленного внедрения активированного раствора коагулянта сульфата алюминия в технологической схеме очистки воды на очистных сооружениях водопровода КПП «Краматорский водоканал» г. Краматорска, КП «Светловодский горводоканал» г. Светловодска. Разработана проектная документация для внедрения технических решений по повышению эффективности работы очистных сооружений хозяйственно-питьевого водопровода г. Воронежа (Российская Федерация).

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью данной работы является выполнение специальных исследований, позволяющих обосновать теоретические предпосылки интенсификации процессов очистки воды с помощью активированного раствора коагулянта сульфата алюминия.

Для достижения поставленной задачи исследовано влияние активированного раствора коагулянта сульфата алюминия на электрокинетический потенциал примесей в процессах очистки воды и изменение адсорбционной емкости гидроксида алюминия при обработке воды активированным раствором коагулянта.

Активирование раствора коагулянта осуществляется в специальном устройстве, предусматривающем образование ионных ассоциатов, возникающих вследствие магнитной обработки и закрепление их анодно-растворенным железом [14,15].

Теория образования ионных ассоциатов при магнитной обработке раствора обоснована в трудах Классена В.И., Терновцева В.Е. и др. [16].

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

При очистке природных вод от коллоидных и грубодисперсных загрязнений главными критериями полноты протекания процесса коагуляции можно считать величину ξ -потенциала, характеризующую агрегативную устойчивость коллоидных систем и адсорбционную емкость гидроксида алюминия, образующегося в процессе очистки воды [11,12]. При значении ξ -потенциала ($\xi=0$), коллоидная частица не несет на себе заряд по отношению к вододисперсной среде, поэтому гидратная оболочка минимальная, что соответствует изoeлектрическому состоянию частиц и наиболее выраженному процессу коагуляции. Адсорбция примеси на гидроксида алюминия зависит в основном от природы адсорбентов, характера адсорбированных веществ и ионного состава природных вод.

Агрегативная устойчивость коллоидных систем определяется не только наличием электростатических сил отталкивания, но и другими факторами, основным из которых является гидратация частиц, т.е. образование на их поверхности оболочек из молекул дисперсионной среды. В гидрофобных золях после достижения пороговых концентраций электролитов, наблюдаются явные признаки коагуляции, поскольку происходит сжатие двойного слоя и соответствующее уменьшение гидратных оболочек, что позволяет коллоидным частицам сближаться на расстояние, при котором энергия их взаимного притяжения превышает энергию теплового (броуновского) движения. Изменение толщины диффузного слоя характеризуется величиной электрокинетического

потенциала (ξ - потенциала). Чем сильнее размыт диффузный слой, тем выше ξ - потенциал и, наоборот, при предельном сжатии диффузного слоя ξ - потенциал приближается к нулю.

Влияние активированного раствора коагулянта сульфата алюминия на ξ - потенциал коагулированных примесей приведено нами ранее [8]. Основные положения методики проведения экспериментов изложены в работе [25].

Анализ, выполненных нами исследований, показывает, что эффективность влияния активированного раствора сульфата алюминия на гидравлическую крупность коагулированной взвеси при эффективных параметрах активации зависит от содержания взвешенных веществ в осветляемой воде [18,23].

Последнее подтверждается опытными данными, приведенными выше и в табл. 1 и 2.

Установлено, что на снижение ξ - потенциала золя гидроксида алюминия незначительно (2,9-5,4%) влияет магнитная активация, несколько больше – электрокоагуляционная активация, где раствор насыщается анодно-растворенным железом. Максимальное снижение ξ - потенциала золя $Al(OH)_3$ достигается при магнитно-электрической активации. Наибольшее снижение – при напряженности магнитного поля 350 кА/м и содержании анодно-растворенного железа – 525 мг/дм³.

Адсорбция коллоидных частиц зависит от их дисперсности – адсорбция коллоидов тем больше, чем выше их дисперсность и чем меньше

их устойчивость. В обычных условиях с уменьшением устойчивости коллоидов всегда понижается и степень их дисперсности. Под действием этих двух противоположно влияющих на адсорбцию факторов кривая, изображающая зависимость адсорбируемости коллоидов от их дисперсности, проходит через максимум. Было отмечено, что адсорбционная устойчивость коллоидов не всегда совпадает с устойчивостью по отношению к электрокоагуляции. Вследствие этого был введен термин «адсорбционная устойчивость». Защищенные золи адсорбируются хуже незащищенных, однако те концентрации электролитов, которые не вызывают еще явной коагуляции, часто оказываются достаточными для уничтожения адсорбционной устойчивости защищенных зелей.

При наличии ξ - потенциалов одинакового знака у адсорбентов и адсорбтива он является препятствием для адсорбции, и ее емкость понижается. При адсорбции частиц, ξ - потенциал которых противоположен по знаку потенциалу адсорбента, электростатические и Ван-дер-Ваальсовские силы адсорбции действуют в одном направлении, в результате чего адсорбируемость золя и его адсорбционная емкость возрастают. Однако, когда электрические заряды золя различны по знаку, наличие высокого ξ - потенциала золя должно уменьшить его адсорбируемость. Это обусловлено тем, что, обладая большим ξ - потенциалом, частицы приобретают высокую агрегативную устойчивость, препятствующую их сближению друг с другом в адсорбционном слое.

Таблица 1. Влияние активированного раствора сульфата алюминия на эффективность осветления воды
Table 1. Effect activated solution of aluminum sulfate in water clarification efficiency

Содержание взвешенных веществ в осветляемой воде, мг/дм ³	Остаточное содержание взвешенных веществ, мг/дм ³		Эффект осветления воды, %	Примечания
	обычный раствор коагулянта	активированный раствор коагулянта		
25	3,3	2,6	128,5	1. Гидравлическая крупность коагулированной взвеси 0,2мм/с. 2. Температура осветляемой воды 2,5-3,5°С. 3. Параметры активации эффективные.
50	3,8	2,9	131,2	
100	3,5	2,5	150,4	
150	3,2	2,0	159,5	
200	3,9	2,6	149,6	
250	4,6	3,1	148,1	
300	5,2	4,1	127,7	

Таблица 2. Влияние активированного раствора коагулянта сульфата алюминия на остаточное содержание взвешенных веществ в осветляемой воде

Table 2. Influence activated coagulant solution of aluminum sulfate in the residual content of suspended solids in the water lightens

Содержание взвешенных веществ в осветляемой воде, мг/дм ³	Напряженность магнитного поля, кА/м	Содержание в растворе анодно-растворенного железа, мг/дм ³	Остаточное содержание взвешенных веществ в осветляемой воде, мг/дм ³		Примечание
			Обычный раствор коагулянта	Активированный раствор коагулянта	
25	200	150	5,8	4,6	1. Гидравлическая крупность коагулированной взвеси 1,2мм/с. 2. Температура осветляемой воды 10,5-11,5°С. 3. Параметры активации эффективные.
50	250	175	7,1	5,4	
100	300	250	7,7	5,3	
150	400	525	7,5	5,1	
200	525	675	8,3	5,8	
250	675	800	7,9	5,8	
300	950	875	8,1	6,3	

Адсорбционная активность гидроксида алюминия также зависит от природы адсорбентов, от характера адсорбированных веществ и ионного состава природных вод.

Изменение ξ -потенциала золя гидроксида алюминия и удельной адсорбционной емкости гидроксида алюминия в зависимости от параметров активации приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3. Изменение ξ -потенциала золя гидроксида алюминия в зависимости от параметров активации раствора коагулянта сульфата алюминияTable 3. Change of ξ -potential of gel of aluminum hydroxide depending on the activation parameters of coagulant solution of aluminum sulfate

Серия опытов	Параметры активации		Величина ξ -потенциала, мВ	Величина доверительного интервала, (а), мВ, ($\gamma=0,95$); (n=4)
	напряженность магнитного поля, Н, кА/м	содержание анодно-растворенного железа, Fe ³⁺ , мг/дм ³		
А	-	-	129,3	127,8<a<131,4
	150	Fe ³⁺ =	115,5	114,3<a<116,6
	250	550 мг/дм ³	109,6	108,1<a<110,3
	450	раствора	107,7	106,2<a<101,4
	550	коагулянта (const)	110,3	109,3<a<111,5
	650		113,5	112,5<a<114,6
Б	Н=350 кА/м (const)	-	129,5	128,1<a<131,9
		100	114,3	113,3<a<115,7
		250	109,5	108,8<a<110,4
		350	106,3	105,1<a<107,7
		450	107,4	106,2<a<108,6
		550	110,6	109,2<a<111,9

Таблица 4. Изменение удельной адсорбционной емкости гидроксида алюминия в зависимости от параметров активации раствора коагулянта сульфата алюминия

Table 4. Change of adsorption specific-capacitance of aluminum hydroxide depending on the activation parameters of coagulant solution of aluminum sulfate

Серия опытов	Параметры активации		Удельная адсорбция гуминов на гидроксида сульфата алюминия, Г ₀ , мг/г	Величина доверительного интервала, (а), мВ, (γ=0,95); (n=4)
	напряженность магнитного поля, Н, кА/м	содержание анодно-растворенного железа, Fe ³⁺ , мг/дм ³		
В	-	-	345,7	344,2<a<347,5
	125	Fe ³⁺ =	401,4	396,3<a<402,2
	200	550 мг/дм ³ раствора	401,7	396,8<a<402,8
	350	коагулянта (const)	418,6	416,1<a<419,9
	450		433,5	440,2<a<434,2
	550		432,9	434,5<a<430,3
Г	Н=350 кА/м (const)	-	351,2	349,4<a<353,2
		125	410,5	408,8<a<412,2
		200	415,3	414,1<a<416,6
		350	424,3	421,8<a<424,2
		450	438,6	436,6<a<435,2
		550	448,6	444,9<a<442,3

Результаты выполненных экспериментов показали хорошую воспроизводимость опытных данных в пределах доверительного интервала, рассчитанного на основании четырех параллельно выполненных опытов.

Влияние активированного раствора коагулянта сульфата алюминия на эффективность осветления воды (гидравлическая крупность коагулированной взвеси 0,2мм/с) приведено на рис. 1 и имеет вид:

$$\varepsilon = 0,0015P^2 + 0,5079P + 114,12. \quad (1)$$

где: Э – эффективность осветления воды, %;

Р – содержание взвешенных веществ в осветляемой воде, мг/дм³.

Сравнительные данные эффективности осветления воды, полученные опытным и расчетным путем показывают (приведенные в табл. 5 и 6), что полученная зависимость (1) достаточно полно отражает влияние активированного раствора коагулянта сульфата алюминия на эффективность осветления воды (погрешность в пределах 0,26-4,28%).

Таблица 5. Сравнительные данные эффективности осветления воды активированным раствором коагулянта сульфата алюминия полученные опытным и расчетным путем

Table 5. Comparative data efficiency of water clarification activated sodium aluminum sulfate coagulant obtained experimentally and theoretically

Содержание взвешенных веществ в осветляемой воде, мг/дм ³	Эффективность осветления воды, %		Погрешность, %		Примечания
	опытные данные	расчетные данные	абсолютная погрешность	% погрешности	
25	128,5	125,8	2,69	2,09	1. Гидравлическая крупность коагулированной взвеси 0,2мм/с и более 2. Температура осветляемой воды 2,5-3,5°C. 3. Параметры активации эффективные
50	131,2	135,7	-4,54	-3,46	
100	150,4	150,0	0,4	0,26	
150	159,5	156,8	2,74	1,72	
200	149,6	156,1	-6,5	-4,28	
250	148,1	147,8	0,33	0,22	
300	127,7	132,0	-4,32	-4,3	

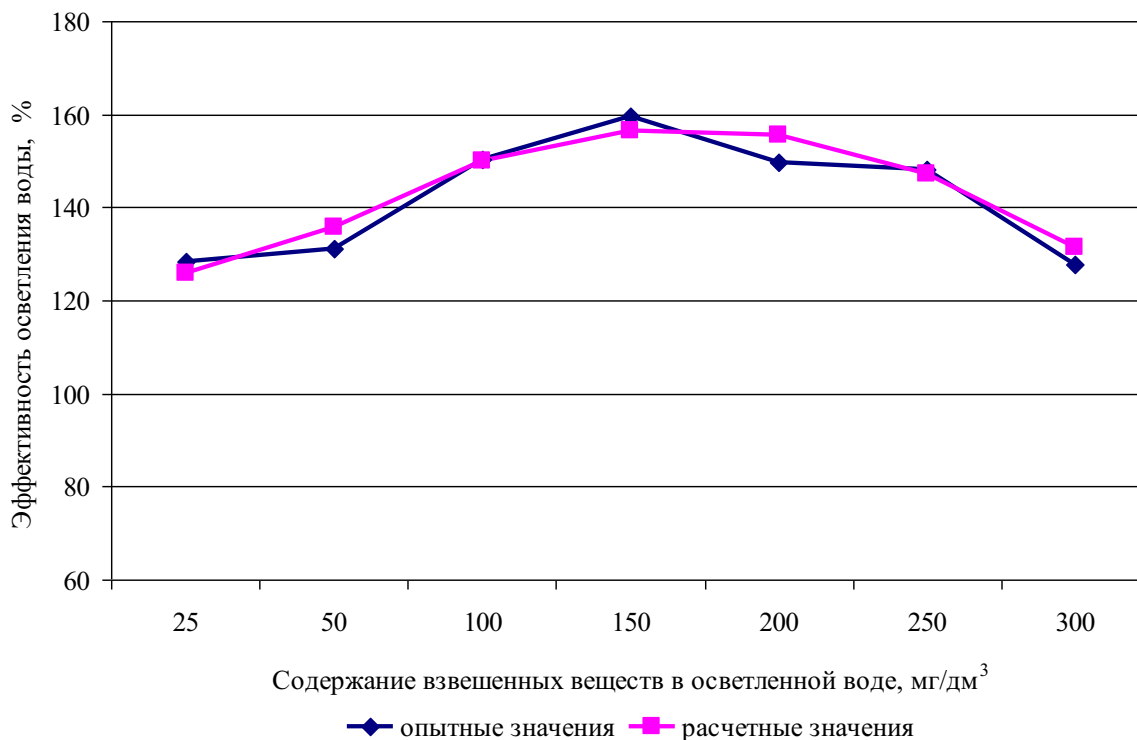


Рис. 1. Влияние активированного раствора коагулянта сульфата алюминия на эффективность осветления воды
 Fig. 1. Influence activated coagulant solution of aluminum sulfate the efficiency of water clarification

Таблица 6. Сравнительные данные эффективности осветления очищаемой воды канала Северский Донец – Донбасс полученные опытным и расчетным путем
 Table 6. Comparative data efficiency lightening of treated water channel Seversky Donets - Donbas obtained experimentally and theoretically

Содержание взвешенных веществ в осветляемой воде, мг/дм³	Остаточное содержание взвешенных веществ, мг/дм³		Эффективность осветления воды, %		Погрешность, %	Примечание
	обычный раствор коагулянта	активированный раствор коагулянта	опытные данные	расчетные данные		
20,5	5,4	4,1	131,7	128,3	2,56	Гидравлическая крупность коагулированной взвеси 0,2 мм/с, параметры активации эффективные
22,1	5,6	4,2	133,3	129,2	3,08	
22,8	5,5	4,1	134,1	129,7	3,25	
среднее 21,8	среднее 5,5	среднее 4,1	среднее 133,1	среднее 129,1	среднее 2,96	

Аппроксимация экспериментальных данных в программе Excel позволила вывести зависимости изменения ξ -потенциала адсорбционной емкости гидроксида алюминия от параметров активации коагулянта сульфата алюминия, которые имеют следующий вид.

- $\xi = 2,96H + 118$ ($Fe^{3+} = \text{const}$)
 $\xi = 2,45Fe^{3+} + 116$ ($H = \text{const}$)
- $\Gamma_0 = 9,52H + 389,02$ ($Fe^{3+} = \text{const}$)

$\Gamma_0 = 9,95Fe^{3+} + 397,71$ ($H = \text{const}$),
 где ξ – электрокинетический потенциал, мВ;
 Γ_0 – удельная адсорбционная емкость, мг/г;
 H – напряженность магнитного поля, кА/м;
 Fe^{3+} – содержание анодно-растворенного железа в растворе коагулянта, мг/дм³.

Сравнительные данные изменения ξ -потенциала и адсорбционной емкости гидроксида алюминия, полученных расчетным и опытным путем приведены в табл. 7.

Таблица 7. Сравнительные данные изменения ξ -потенциала и адсорбционной емкости гидроксида алюминия, полученных расчетным и опытным путемTable 7. Comparative data changes ξ -potential and adsorption capacity of aluminum hydroxide, obtained by calculation and empirically

Серия опытов	Параметры активации		Величина ξ -потенциала, мВ		Удельная адсорбционная емкость, Γ_0 , мг/г	
	напряженность магнитного поля, Н, кА/м	содержание анодно-растворенного железа, Fe^{3+} , мг/дм ³	расчетным путем	опытным путем	расчетным путем	опытным путем
Д	-	-	-	130,5	-	344,2
	200	$\text{Fe}^{3+} =$	112,6	111,9	398,8	399,2
	350	350 мг/дм ³	111,2	111,8	420,5	415,1
	450	раствора коагулянта	106,5	107,3	424,6	421,3
	550	(const)	111,2	112,4	431,5	433,6
Е	-	-	-	129,8	-	353,3
	H=450 кА/м	150	112,5	119,2	408,6	410,1
	(const)	250	108,1	107,8	421,5	422,5
		375	107,6	106,6	436,5	442,3
		425	108,4	109,1	435,8	443,6

Проведенная аппроксимация экспериментальных данных полученных зависимостей в программе Excel позволяет анализировать влияние параметров активации раствора коагулянта сульфата алюминия на ξ -потенциал и адсорбционную емкость золя гидроксида алюминия, образующихся в процессе очистки воды и использовать полученные зависимости в практических расчетах.

ВЫВОДЫ

Таким образом, механизм влияния активированных растворов реагентов на процессы очистки воды можно объяснить следующими факторами:

1. Наложение на водные растворы внешнего магнитного поля изменяет их структуру и создает условия для образования ионных ассоциатов субмикроскопической и коллоидной степени дисперсности;
2. Возникшие под влиянием магнитного поля ионные ассоциаты являются зародышами новой фазы ассоциатов субмикроскопической и коллоидной степени дисперсности и после их стабилизации выполняют роль дополнительных центров коагуляции;
3. Стабилизация ионных ассоциатов осуществляется с помощью анодно-растворенного железа, содержание которого не превышает 1000-1500 мг/дм³ 10% раствора коагулянта сульфата алюминия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабенков С., 1977. Очистка воды коагулянтами. – М.: Наука. – 356.
2. Валкина Е., Вернези С., Николаенко И., Богущкий П., 2010. Использование методов водочистки в новейших энергосберегающих технологиях // MOTROL. – № 12С. – 114-120.
3. Василенко А., Грабовский П., Ларкина Г. и др., 2007. Реконструкция и интенсификация сооружений водоснабжения и водоотведения: Учебн. пособие. – К. - Одесса: КНУСА, ОГАСА. – 307.
4. Вишневецкий В., Сташук В., Сакевич А., 2011. Водогосподарський комплекс у басейні Дніпра: Наукове видання. – К.: Інтерпрес ЛТД. – 188.
5. Гончарук В., Клименко Н., Врубель Т., и др. 2006. Современные технологии подготовки питьевой воды // Химия и технология воды. – Т. 28. – №1. – 3-10.
6. Грабовский П., Ларкина Г., Прогульный В., 2003. Очистка природных вод: Учебное пособие. – Одесса: ОГАСА. – 267.
7. Душкин С., 2013. Санитарно-экологические требования к качеству питьевой воды // Мат. научно-технической интернет конф. "Ресурсосбережение и энергоэффективность инженерной инфраструктуры урбанизированных территорий". – Харьков: ХНАГХ, 82-83.

8. Душкин С., 2012. Методологические аспекты проведения исследований при использовании активированных растворов коагулянтов в процессе очистки воды // Комунальне господарство міст. – Харків; ХНАМГ. – Вип. 105. – 320-334.
9. Журба М., Соколов Л., Говорова Ж, 2010. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: в 3т Т.2. Очистка и кондиционирование природных вод – изд. 3-е, перераб. и доп.: Учебное пособие. – М.: Издат. АСВ. – 532.
10. Журба М., Любина Т., Мезенцева С. и др., 1994. Новые решения в подготовке питьевых вод // Водоснабжение и санитарная техника. - №1.
11. Куликов Н., Найманов А., Омельченко Н., Чернышов В., 2009. Теоретические основы очистки воды: Учебное пособие. – Донецк: Издат. «Ноулидж» (Донецкое отделение). – 298.
12. Кульский Л., 1980. Теоретические основы и технология кондиционирования воды. – К.: Наук. думка. – 564.
13. Найманов А., Никиша С., Насонкина Н., Омельченко Н., Маслак В., Зотов Н., Найманова А, 2006. Водоснабжение. – Донецк: ООО «Норд Комп'ютер». - 654.
14. Пат. 103698 Україна, МПК C02 F1/48. Пристрій для активації розчинів реагентів / Эпоян С.М., Душкін С.С., Шевченко Т.О., Айрапетян Т.С.; заявник та власник ХНУБА, ХНМГ - № а 201203185; заявл. 19.03.2012; опубл. 11.11.2013, Бюл. №21.
15. Пат. 103295 Україна, МПК C02 F1/48. Спосіб приготування розчину алюмовмісного коагулянту для очищення природних і стічних вод / Эпоян С.М., Душкін С.С.; заявник та власник ХНУБА - № u 201210965; заявл. 19.09.2012; опубл. 29.09.2013, Бюл. №18.
16. Терновцев В., Пухачев В., 1986. Очистка промышленных сточных вод. – К.: Будівельник. – 120.
17. Тугай А., Орлов О., 2009. Водопостачання. - К.: Знання. – 735.
18. Эпоян С., Благодарная Г., Сташук В., Душкин С, 2013. Повышение эффективности работы сооружений при очистке питьевой воды: монографія. – Харків: ХНАГХ. – 190.
19. Эпоян С., Душкин С., 2013. Интенсификация реагентных методов очистки воды // Мат. конф. "Сучасні проблеми охорони довкілля та раціонального використання ресурсів у водному господарстві", (22-26 квітня 2013р. м. Миргород).– К.: Т-во "Знання України". – 45-48.
20. Эпоян С., Душкин С, 2012. Влияние активированных растворов сульфата и оксихлорида алюминия на эффективность осветления воды // Науковий вісник будівництва: наук.-техн. зб. – Х.: ХНУБА. ХОТВ АБУ. – Вип. 69. – 348-352.
21. Эпоян С., Душкин С., 2013. Влияние обработки воды активированным раствором коагулянта на параметры фильтрования воды на скорых фильтрах // Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. – Вип. 109. – 65-73.
22. Эпоян С., Душкин С., 2012. Активированные растворы реагентов в процессах очистки природных вод // Водопостачання та водовідведення: Виробничо-практичний журнал. – К.: Гнозис. - №4. – 8-10.
23. Эпоян С., Душкин С., 2013. Теория и практика использования активированного раствора коагулянта сульфата алюминия для интенсификации работы очистных сооружений водопровода // Матер. междунар. научн.-практ. конф., (23.04.2013 г. Санкт-Петербург, РФ). – С.-П.: ПГУПС. – 72-74.
24. Эпоян С., Душкин С., 2013. Использование активированных растворов реагентов при подготовке экологически чистой питьевой воды // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – Вып. 63. – 62-66.
25. Эпоян С. Душкин С., 2013. Снижение агрегативной устойчивости коллоидной примеси природных вод активированным раствором коагулянта сульфата алюминия // MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences. – Lublin-Rzeszow. – Vol. 15. – №5. – 11-16.

THEORETICAL BASES ACTIVATION
COAGULANT SOLUTIONS OF
ALUMINUM OF SULFATE FOR PREPARATION OF
DRINKING WATER

Summary. Examined influence theoretical bases of the activated solution of coagulant of sulfate of the aluminium used for preparation of drinking-water. Theoretical pre-conditions over are brought, explaining the mechanism of increase of efficiency of work of waterworks at preparation of drinking-water with the use of the activated solution of coagulant of sulfate of aluminium.

Key words: preparation drinking water, activated solutions, electrokinetic potential, adsorption capacity, intensification of water treatment.

ГИДРАТООБРАЗОВАНИЕ В ГАЗОВОМ ЭЖЕКТОРЕ

Александр Редько, Елена Бабенко

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры
 Адрес: Украина, г. Харьков, ул. Сумская, 40
 E-mail: eobabenko@gmail.com

Аннотация. В данной статье обращено внимание на возможность гидратообразования в газовом эжекторе. Даны рекомендации по определению условий безгидратной эксплуатации эжектора, проведению перерасчетов потерь энергии в эжекторе с учетом поправки в случае выпадения гидратов и температуры на выходе эжектора с учетом влажности рабочей среды.

Ключевые слова: гидратообразование, влажность газа, реальный газ, эжектор.

ВВЕДЕНИЕ

Существует несколько схем установок утилизации сбросного газа на газораспределительных станциях с помощью газового эжектора. Согласно [26], используя в качестве активного (рабочего) потока газ высокого давления со входа газораспределительной станции (ГРС) 1 (рисунок 1), эжектируется сбросной газ с расходной емкости одоранта 4 или емкости хранения одоранта 5. Газ на выходе из эжектора 3 поступает в технологический трубопровод 6, а затем к потребителю. Это позволяет утилизировать часть газа, сбрасываемого в окружающую среду через технологический газопровод 7.

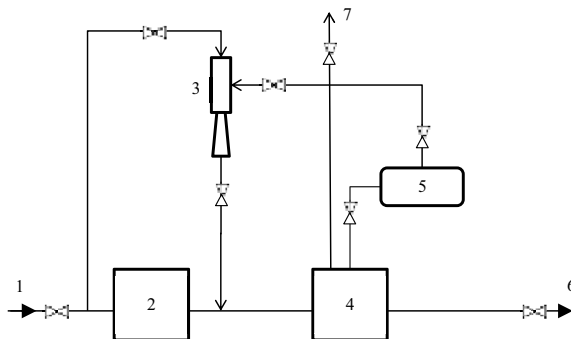


Рис. 1. Установка утилизации газа с помощью газового эжектора:

- 1- вход газа на ГРС,
- 2- блок редуцирования,
- 3- эжектор,
- 4- блок одоризации,
- 5- емкость хранения одоранта,
- 6- выход газа с ГРС,
- 7- технологический газопровод

Fig. 1. Installation recycling gas with a gas ejector:

- 1 - input gas distribution station,
- 2 - reduction unit,
- 3 - ejector,
- 4 - unit odorisation,
- 5 - storage capacity of odorant,
- 6 - exit gas from the gas distribution station,
- 7 - pipeline technology

Состояние движущегося газа с известными термодинамическими свойствами определяется заданием скорости, плотности и давления. Для нахождения этих функций служит система уравнений, которая может быть представлена в дифференциальной форме общих законов сохранения массы, импульса и энергии. Согласно [19], поиск решений систем дифференциальных уравнений аналитическими и численными методами связан со значительными трудностями ввиду сложности физико-химических процессов. Кроме этого, в общем случае течение газов может приобретать докритическую, сверхкритическую и критическую скорости, для описания которых требуется различный математический аппарат. Необходимо решение уравнений в частных производных. Построение некоторых аналитических решений, основанных на приближенных расчетах, позволяет, значительно упростив методы решения, установить многие важные качественные закономерности. В связи с этим актуальным является рассмотрение одномерной теории течения газов.

Одномерная теория является в настоящее время основой инженерных расчетов, поскольку позволяет с достаточной точностью рассчитывать параметры течения потоков небольших скоростей. При определении термодинамических характеристик обычно используют уравнение состояния идеального газа для каждого индивидуального вещества и для всей смеси в целом. Однако в ряде случаев отклонение от идеальности за счет межмолекулярных взаимодействий (силы Ван-дер-Ваальса) может привести к заметным погрешностям при вычислении термодинамических свойств. Термодинамические свойства реальных газов могут быть определены, если известно уравнение состояния. Обзор уравнений состояния приведен во многих работах, например в [6, 9].

Реальные газы [9] описываются уравнением состояния идеального газа только приближенно, и отклонения от идеального поведения становятся заметными при высоких давлениях и низких температурах, особенно когда газ близок к конденсации.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

В результате анализа опубликованных работ по расчету газовых эжекционных устройств было выявлено, что при всём многообразии методик расчета наиболее точными и удобными являются методики, основанные на уравнениях неразрывности, количества движения и энергии [22]. Данная методика удобна тем, что позволяет проводить расчет в двух направлениях: подбирать оптимальный по конструкции эжектор для заданных условий и строить характеристику работы эжекционного устройства для различных режимов. Однако расчетные соотношения получены авторами в предположении, что потоки газов в устройстве подчиняются уравнению состояния идеального газа. Существующие же методики, учитывающие реальные свойства газов, либо слишком громоздки, либо имеют приблизительный, оценочный характер, либо в узкоспециализированной литературе приводятся эмпирические зависимости, позволяющие наиболее точно подобрать определенный вид эжекционного устройства для каких-то конкретных условий.

Теоретические и экспериментальные исследования последних лет, а также возможность применения эжекционного оборудования в системе газоснабжения, дают основание считать целесообразным усовершенствование методики расчета газового эжектора, базирующейся на уравнениях неразрывности, количества движения и энергии, с учетом свойств реального газа [21].

Согласно методике [22], при одинаковых показателях адиабаты и одинаковых газовых постоянных взаимодействующих потоков, т.е. при $k_p = k_n$ и $R_p = R_n$, а также при одинаковых изобарных теплоемкостях ($c_{pp} = c_{pn} = c_{pc}$) температура сжатого потока газа определяется по формуле:

$$T_c = \frac{T_p + uT_n}{1 + u}, \quad (1)$$

где: T_c – температура смеси на выходе эжектора, К,

T_p – температура рабочего потока, К,

T_n – температура низконапорного потока, К,

u – коэффициент эжекции (отношение расходов низконапорного потока газа и рабочего потока газа).

Как отмечают авторы, данная формула применима только для идеальных газов. В противном случае рекомендуется значение T_c находить подбором по диаграмме [22], основываясь на уравнении теплового баланса.

В нормативной литературе при измерении расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств (ГОСТ 8.586.1-2009) [18] температуру газа в отверстии сужающих устройств T_0 определяют по следующей формуле:

$$T_0 = T \left(1 - \frac{\Delta P}{P} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad (2)$$

где: T – температура газа, измеренная до сужающего устройства, К,

P – давление газа, измеренное до сужающего устройства, МПа,

ΔP – перепад давления на сужающем устройстве, МПа,

k – показатель адиабаты.

При выводе данного уравнения (2) было сделано допущение, что плотность среды при ее течении через сужающее устройство не изменяется. Это допущение справедливо для несжимаемых сред. Для газов такое допущение может привести к значительной потере точности результатов расчётов.

Данное выражение для определения температуры на выходе из сопла встречается и в работах Г. А. Аронса [1]. Оно основано на уравнении адиабатического расширения:

$$\frac{T_p}{T_{pn2}} = \left(\frac{P_p}{P_{pn2}} \right)^{\frac{k_p-1}{k_p}}, \quad (3)$$

где: T_{pn2} – температура газа на выходе из сопла, К,

P_{pn2} – давление газа на выходе из сопла, МПа,

T_p – температура газа рабочего потока, К,

P_p – давление газа рабочего потока, МПа,

k_p – показатель адиабаты рабочего потока.

Данное уравнение предлагается к использованию и Л.В. Кнауб в [14]. При определении температуры предлагается учитывать массовую долю смешиваемых потоков. Когда рассчитаны такие параметры газов, как расход и скорость, необходимо уточнение полученных результатов расчета.

В технической литературе [4] температуру газа на выходе из ступени сжатия компрессорных агрегатов предлагается определять по следующему уравнению:

$$T_k = T_n E^{\frac{k-1}{k\eta}}, \quad (4)$$

где: T_k – температура на выходе из компрессора, К,

T_n – температура на входе, К,

E – степень сжатия газа,

η – КПД компрессорного агрегата.

Однако, после прохождения природного газа через сужения газопроводов, в том числе и через сопло Лаваля, происходит его резкое расширение. Этот процесс называется дросселированием. Процесс дросселирования влечет за собой резкое падение давления и понижение температуры газа. Этот процесс называется положительным эффектом Джоуля-Гомсона.

Дросселирование – это процесс необратимого превращения работы, затрачиваемой на изменение

давления при движении газа, в теплоту при постоянной энтальпии [16]. Для характеристики его введен коэффициент Джоуля-Томсона. Известно, что при некоторых условиях коэффициент Джоуля-Томсона может быть положительным (происходит охлаждение газа) и отрицательным (сопровождается нагреванием). Во время дросселирования в устройстве газ охлаждается тем больше, чем меньше он подчиняется свойствам совершенных газов, для которых процесс дросселирования всегда изотермичен [3].

К примеру, для природного газа во всем диапазоне давлений и температур, которые имеют место при редуцировании газа на ГРС, среднее значение коэффициента Джоуля-Томсона часто принимается равным 5,5 град/МПа, т. е. при снижении давления газа на 1 МПа его температура понижается на 5,5°C. Значение коэффициента Джоуля-Томсона можно рассчитать с помощью специальных компьютерных программных средств. К примеру, на основании уравнения состояния ВНИЦ СМВ разработана методика [20] определения расчетных значений коэффициента Джоуля-Томсона для природного газа. Кроме того, значение коэффициента Джоуля-Томсона приведено в различных справочных данных, как для чистых газов, к примеру, для метана [23], так и для природных газов. Среднее значение коэффициента Джоуля-Томсона D_i для газов с содержанием метана более 85 %, рекомендуется определять по формуле:

$$D_i = \frac{1}{C_{CP}} \left(\frac{E_1}{T_{CP}^2} - E_2 \right), \quad (5)$$

где: c_{cp} , T_{cp} – средние значения изобарной теплоемкости (кДж/кг К) и температуры (К).

Значение коэффициентов E_1 , E_2 следует принимать: $E_1 = 0,980 \cdot 10^6$; $E_2 = 1,5$.

Значение D_i для газа с содержанием метана более 85 % допускается определять по графику зависимости от давления и температуры газа.

Исследования [11] показывают, что температурный эффект дросселирования в критической точке имеет для всех веществ положительное значение. Следовательно, дросселирование вещества в области критических значений приводит всегда к понижению его температуры. Это свидетельствует о необходимости учета явления Джоуля-Томсона в сверхзвуковых соплах, где параметры рабочих потоков газов могут быть близки к критическим значениям.

На практике часто используют следующее выражение для определения температуры с учетом дроссель-эффекта:

$$T_2 = T_1 - D(P_1 - P_2), \quad (6)$$

где: T_1 , T_2 – температура газа до и после дросселирования, К,

P_1 , P_2 – давление газа в тех же условиях, МПа,

D – коэффициент адиабатного дроссель-эффекта (Джоуля-Томсона), К/МПа.

В эжекторе происходит снижение рабочего давления до давления смеси на выходе аппарата, что свидетельствует о необходимости учета процесса дросселирования при вычислении температуры сжатого потока.

И. Н. Царев предлагает для определения температуры на выходе из эжектора с учетом дроссель-эффекта использовать следующую формулу:

$$T_c = \frac{T_p + uT_n - D(P_p - P_c)}{1 + u} \quad (7)$$

Выражение (7) получено путем совместного решения уравнений (1) и (6). Данное уравнение (7) используется в методиках Всесоюзного научно-исследовательского института природных газов, например, при составлении инструкций по эксплуатации газовых эжекторов [12].

При определенной концентрации воды, при определенных давлениях и температурах газа в газопроводах могут возникнуть такие кристаллические образования, в построении которых молекулы воды участвуют как самостоятельные единицы. Они получили название кристаллогидраты. Кристаллогидраты представляют собой соединения углеводородов с водой ($\text{CH}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; $\text{C}_2\text{H}_6 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). Чем выше давление и ниже температура газа, тем сильнее и быстрее идет процесс образования гидратов.

Природный газ, добываемый из подземных источников, насыщен жидкой водой и тяжёлыми углеводородами. Присутствие водяных паров может иметь самые неприятные последствия [12]. Срок службы трубопровода определяется скоростью коррозии, которая напрямую связана с присутствием влаги в газе, поскольку она способствует окислению. Кроме того, образование гидратов может снизить пропускную способность трубопровода, что способно привести к закупорке и повреждению фильтров, кранов и компрессоров. Гидраты являются соединением избыточной воды с парами жидких углеводородов, которые могут конденсироваться из газа при транспортировке, образуя эмульсии, которые при рабочем давлении представляют собой твёрдые массы.

Например, влажный пар представляет собой двухфазную жидкость, состоящую из сухого насыщенного пара и частичек влаги, равномерно распределенных в паре [24]. Свойства влажного пара гораздо сложнее свойств перегретого, так как согласно уравнению состояния для влажного газа определенному давлению соответствует вполне определенная температура насыщения. Удельный объем может иметь любое значение в зависимости от степени сухости влажного пара.

Осушка природного газа до точки росы ниже рабочей температуры вымораживающей установки, несомненно, представляет большую важность для предотвращения проблем с закупориванием в

результате замерзания, что отрицательно сказывается на эффективности.

В струйном насосе вследствие эффекта Джоуля-Томсона возможно снижение температуры потока ниже точки росы, в результате чего возможно изменения агрегатного состояния газа. Согласно [24], это приводит к необходимости принимать известные допущения при расчете эжектора и отражается на точности получаемых результатов.

Во избежание образования гидратов газ осушают до точки росы, температура которой должна быть ниже температуры газа в газопроводах. Для природного газа существуют две температуры точки росы — точка росы по влаге и точка росы по углеводородам. Последняя — это температура, при которой из газа начинают конденсироваться жидкие углеводороды. Эти жидкие углеводороды представляют собой компоненты газа с более высоким молекулярным весом — обычно бутан и более тяжёлые углеводороды.

Известно [4], что на практике глубина извлечения паров воды из газа характеризуется точкой росы по влаге. Фиксированные в стандартах точки росы по влаге указывают на равновесное содержание газа при заданной температуре. Точка росы осушенного газа должна быть на 5 - 10 °С ниже, чем самая низкая рабочая температура газа в процессе подготовки или транспортирования. Однако и это может не обеспечивать сухой режим эксплуатации. Это объясняется как уносом гликоля с газом в капельном виде, так и изменением давления, температуры и других параметров газа. Опыт эксплуатации [15] свидетельствует о том, что также и при понижении температуры наружного воздуха практически в любых природно-климатических условиях возможно обледенение оборудования. При появлении обледенения гидравлическое сопротивление газового оборудования возрастает, что может привести к нестабильной работе и даже к разрушению.

Существует много факторов, которые способствуют образованию гидратов: это высокая скорость и пульсация потоков, резкие повороты, внезапное сужение потока и т.д. [16].

Но как отмечено А.П. Меркуловым в [17], если в процессе охлаждения температура потока не снизится ниже точки росы влажного газа, то при инженерных расчетах в большинстве случаев можно не вводить поправки в такие зависящие от состава газа постоянные, как показатель адиабаты, газовую постоянную и теплоемкость, так как эти поправки выходят за пределы точности расчета. Если же температура потока снизится ниже точки росы газа, то введение поправки становится уместным. Ощутимость поправки в случаях конденсации и замерзания влаги объясняется высокими значениями теплоты фазовых превращений воды, что даже при небольшом влагосодержании приводит к заметным температурным эффектам.

В.Н. Горбунов, У.Г. Пирумов и Ю.А. Рыжов в работе [7] также отмечают, что влияние конденсации необходимо учитывать, так как повышение давления на стенки сопла по сравнению с течением без конденсации может достигать от 20 до 30%. В ряде задач конденсация в соплах и струях является недопустимой в силу её определяющего влияния на исследуемые явления. Авторы отмечают, что в практически важных случаях необходимо знать истинные параметры начала фазового перехода, в том числе и температуру конденсации.

Однако в нормативной литературе при измерении расхода газа вводится условие, что среда должна быть однофазной и однородной по физическим свойствам [18]. При течении среды через сужающее устройство её фазовое состояние не должно изменяться, а при наличии опасности изменения фазового состояния следует увеличить диаметр отверстия сужающего устройства и (или) рабочее давление. В тоже время при систематизировании качественных характеристик сужающих устройств отмечено, что наличие небольшого содержания конденсата практически не оказывает влияния на коэффициент истечения при прохождении через диафрагму.

В учебном пособии В.А. Барилевича [2] при решении систем дифференциальных уравнений для одномерного двухфазного потока рассмотрены процессы расширения, смешения и конденсации двухфазного потока в каналах переменного сечения с прямой осью. Отмечено, что потери кинетической энергии в двухфазных потоках значительно выше, чем в однофазных. В эжекторах с целью минимизации потерь для двухфазных потоков предлагается учитывать возможность конденсации. Протяженность камеры смешения оказывает существенное влияние на степень повышения давления в аппарате с двухфазными потоками, а, следовательно, и на эффективность. Расчеты, выполненные автором на основе предложенных систем уравнений с учетом уравнений сохранения в интегральной форме, позволяют определить геометрию и размеры проточной части с удовлетворительной точностью. Однако существуют некоторые расхождения при расчете давления на выходе аппарата. Автор объясняет это упрощенной моделью процесса, в которой не учитывались сила трения, дробление, коагуляция капель и другие процессы. Это говорит о необходимости последующей доработки учета явления конденсации в газоструйных аппаратах.

Поэтому при расчете газового эжектора предлагается проверять, возможна ли конденсация методом расчета температуры потока. Если влияние фактора Джоуля-Томсона велико, то будет наблюдаться падение температуры. В случае, когда температура газа на выходе из аппарата будет выше температуры точки росы, то явление конденсации не стоит учитывать.

Замер физико-химических параметров, определяющих температуры точки росы газа, как по влаге, так и по конденсатам, проводится на установках комплексной подготовки газа, газораспределительных станциях и на других объектах в системе газоснабжения. При проектировании эжекционных установок необходимо проводить расчет минимальной температуры в струйном аппарате. Если расчетная температура будет выше температуры точки росы по влаге и по углеводородам, то конденсация не будет происходить, и при расчете среднюю можно считать газовой однофазной.

Если температура в эжекторе будет ниже температуры точки росы или по влаге, или по углеводородам, то для нормальной работы газоструйного аппарата рекомендуется увеличить глубину осушки. Необходимо заметить, что эффективность работы систем глубокой осушки должна быть оценена не степенью сепарации, а абсолютным количеством уносимой жидкой фазы [4]. Последнее более конкретно характеризует влияние уноса жидкой фазы на качественные показатели газа. Непосредственный замер фактического количества жидкости, уносимой с газом, представляет весьма трудную задачу. Замерив фактическую точку росы по воде и зная изотерму процесса, можно определить количество уносимой с газом жидкости косвенным путем. К примеру, при охлаждении газа до температуры -9°C происходит поглощение паров воды гликолем. При этом в зависимости от количества капельного уноса концентрация диэтиленгликоля в жидкой фазе может составлять 85-93%. Температура застывания раствора диэтиленгликоля указанной концентрации находится в пределах от -22 до -42°C . Отсюда следует, что охлаждение газа до температуры ниже -9°C не может привести к застыванию жидкой фазы. Во всех случаях разность температур застывания жидкой фазы и газа составляет не менее 20°C , что гарантирует эксплуатацию объектов без вероятности образования твердой фазы в системе [4].

Однако в зимний период времени при низких температурах наружного воздуха возможно обледенение [15]. В целях предупреждения обледенения возможно использование различных противообледенительных систем, основанных на подогреве газа. Для регистрации условий образования льда в эксплуатации применяют следующие способы: устанавливают термометры для замера температуры потоков газа и атмосферного воздуха, при достижении определенной температуры включают систему подогрева; ведут визуальное наблюдение за состоянием поверхности аппарата на появление обледенения; для автоматической сигнализации предусматривают датчик образования льда. Однако, как показывает практика, обледенение внешней поверхности оборудования не влечет за собой

серьезных нарушений в работе эжектора и не влияет на внутренние процессы, проходящие в аппарате при смешении потоков.

В случае, когда невозможно увеличить глубину осушки, необходимо провести перерасчет режима работы эжектора, так как потери в насосе при возникновении процесса конденсации будут увеличиваться.

Рассмотрим возможные варианты определения температуры безгидратной эксплуатации во влажном газе.

Большое количество работ посвящено определению температуры гидратообразования, в том числе и конкретно во влажном природном газе. Различные подходы, графические и аналитические корреляции для определения параметров гидратообразования, критический обзор их и термодинамические модели фазовых равновесий в системах "природный газ – лёд – газовые гидраты – водные растворы ингибиторов" даны в работах [10], [8]. В работах [4], [13] предложены инженерные расчетные модели для условий гидратообразования в природном газе при давлениях до 35 МПа с различным содержанием компонентов в газе. Для приближенных расчетов условие образования гидратов в зависимости от плотности газа может определяться по графикам [4].

Методика расчета температуры безгидратной эксплуатации [5] регламентирует расчет температуры газа на входе в узел редуцирования, необходимой для предупреждения гидратообразования. Эту методику применяют на газораспределительных станциях с входным давлением до 7,5 МПа без ограничений расхода газа для шести типичных химических составов природного газа. Расчет можно проводить на основе приведенного в методике алгоритма с помощью соответствующего программного обеспечения, или использовать табличные данные. Данную методику можно применять и при расчете температуры безгидратной эксплуатации газовых эжекторов благодаря простоте и актуальности применения на объектах газоснабжения.

В случае если температура в результате расчетов примет значение ниже точки росы по воде или по углеводородам, необходимо проводить мероприятия по увеличению глубины осушки газа, участвующего в процессе эжекции. В противном случае необходимо делать перерасчет режимных характеристик работы газоструйного аппарата в условиях возможного возникновения второй фазы.

Влияние влажности газа на производительность компрессора рассмотрена в [25]. Данную методику можно использовать и в случае эжекционного оборудования. В процессе выполнения расчета необходимо знать величину конденсата перед всасыванием газа, относительную влажность газа и температуру газа перед всасывающим патрубком. Так как относительная

влажность газа величина переменная, то оценивать влияние влажности можно только приближенно.

Пример расчета пароструйного эжектора для откачки воздуха при работе на влажном пару подробно рассмотрен в работе [24]. Расчет основан на уравнениях сохранения энергии, импульсов сил и сохранения массы. Такие величины, как газовая постоянная паровоздушной смеси, показатель адиабаты и парциальное давление пара на выходе из диффузора являются функцией степени сухости пара (отношение количества паровой фазы к общему количеству паровой и жидкой фазы). Для предварительно заданных коэффициентов эжекции принимается несколько значений степени сухости. Далее расчет проводится путем подбора расчетных значений к предварительно заданным. Потери энергии в сопле h_c предлагается находить через скоростной коэффициент φ_1 :

$$h_c = (1 - \varphi_1^2) h_1^{ad} = \zeta_1 h_1^{ad}, \quad (8)$$

где: φ_1 – скоростной коэффициент сопла,

$\zeta_1 = 1 - \varphi_1^2$ – коэффициент потери энергии ($\zeta_1=0,1$ при $\varphi_1=0,95$),

h_1^{ad} – располагаемый перепад тепла при адиабатическом расширении пара с давления рабочего потока перед соплом до давления на выходе из сопла, ккал/кг. Значение располагаемого перепада тепла определяется графически по диаграмме [24] по линии постоянной энтропии.

Метод, приведенный в [24], можно взять за основу при проведении расчетов газового эжектора, в котором в процессе смешения возможно изменение агрегатного состояния одного из потоков. Исходные данные вместо данных по влажному пару можно использовать для влажного природного газа или для влажного метана.

Величину поправки по температуре в случае конденсации и замерзания влаги можно рассчитывать по методу, представленному в [17] в разделе "Учет влажности газа". Явление конденсации в вихревых аппаратах приводит к потерям эффекта охлаждения. При расчете температуры на выходе эжектора с учетом дроссель-эффекта для влажного газа необходимо вводить поправку. Температура смеси газов (7) с учетом поправки на влажность газа изменится на величину δ [17]:

$$\delta = \frac{(q_k + q_n) R}{c_p R_n p_c} (\varphi_1 \%), \quad (9)$$

где: q_k – теплота конденсации, ккал/кг,

q_n – теплота льдообразования, ккал/кг,

c_p – изобарная теплоемкость, ккал/кг·град,

R – газовая постоянная сжатого газа, кгм/кг·град,

R_n – газовая постоянная влажного пара, кгм/кг·град,

p_m – давление насыщенного пара, кг/см²,

p_c – давление сжатого газа, кг/см²,

$\varphi_1 \%$ – относительная влажность, %.

К примеру, для воздушного потока при давлении 6 ата, температуре 20 °С и 100% относительной влажности поправка составляет 7 °С, что хорошо согласуется с экспериментальными результатами [17]. Дросселирование влажных насыщенных паров большой степени влажности приводит к увеличению степени сухости таких паров (влажный газ подсушивается) и одновременному значительному понижению температуры этого потока газа [11], что и учитывает данная поправка (9).

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эжекторы в качестве экологически чистого и энергосберегающего оборудования компримирования газа могут применяться в условиях работы на высоких давлениях, т.е. давлениях, которые превышают 3 МПа, а иногда и 10 МПа. Например, на газораспределительных станциях при одорировании газа в технологическом процессе может использоваться энергия высоконапорного газа из магистрального газопровода (рисунок 1).

В системе газоснабжения на одоризационных установках эжектор, обеспечивающий удаление паров одоранта из емкостей и сброс этих паров в трубопровод, может работать при больших рабочих давлениях. Так, давление на входе в эжектор в одоризаторе газа ОДК 02 (ТУ 3696-059-36214188-2006) составляет 1,2–7,5 МПа. В другом одоризаторе природного газа в качестве рабочего потока газа эжектора, утилизирующего пары одоранта, может выступать канал наддува газом высокого давления (6–12 МПа), сообщенный с магистралью природного газа высокого давления. Если при расчете воспользоваться моделью идеального газа, то при малых и умеренных давлениях модель идеального газа достаточно хорошо согласуется с природным газом. Соответственно, модель идеального газа не подходит для расчетов эжекторов с высоким давлением рабочего потока.

Целью данной работы является разработка рекомендаций по расчету потерь энергии в эжекторе по методу [24] и перерасчет температуры на выходе из эжектора с учетом поправки и расчет потерь энергии в эжекторе в случае гидратообразования.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ ЭЖЕКТОРОВ С УЧЕТОМ ВЛАЖНОСТИ ГАЗА

В результате проведенного исследования при расчете газового эжектора рекомендуется учитывать следующее:

1. При расчете температуры смеси на выходе из эжектора рекомендуется учитывать эффект Джоуля-Томсона. Расчет рекомендуется проводить по формуле (7).

2. Определить температуру безгидратной эксплуатации. Предлагается использование метода [5].

3. Если расчетная температура смеси на выходе из эжектора будет превышать температуру безгидратной эксплуатации, то расчет можно считать окончанным.

4. Если расчетная температура безгидратной эксплуатации будет выше температуры потоков, участвующих в процессе эжекции, необходимо рекомендовать проведение на объекте установки эжектора мероприятий, увеличивающих глубину осушки, и повторить расчет с п.1. Если повышение температуры потоков газов, участвующих в процессе эжекции, не представляется возможным, то рекомендуется произвести расчет потерь энергии в эжекторе по методу [24] и пересчитать температуру на выходе из эжектора с учетом поправки (9) согласно работе [17].

Таким образом, в результате действия эффекта Джоуля – Томсона температура газа на выходе аппарата может снижаться ниже точки росы по влаге или по углеводородам, что может вызвать образование гидратов. Это требует введения поправок, учитывающих потери энергии. В данной статье рассмотрены существующие методы определения температуры безгидратной эксплуатации газового оборудования, что можно взять за основу при определении температуры сжатого потока для газовых эжекторов. В случае, когда расчетная температура безгидратной эксплуатации будет превышать температуру потоков, участвующих в процессе эжекции, рекомендуется провести расчет потерь энергии при гидратообразовании в аппарате и пересчитать температуру на выходе из эжектора с учетом поправок.

ВЫВОДЫ

В результате в данной работе обращено внимание на возможность гидратообразования в газовом эжекторе. Даны рекомендации по определению условий безгидратной эксплуатации эжектора, проведению перерасчетов потерь энергии в эжекторе и температуры на выходе аппарата с учетом влажности рабочей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аронс Г. А. 1948. Струйные аппараты: теория и расчет / Г. А. Аронс. – М.; Л.: Госэнергоиздат. – 139 с.
2. Барилевич В. А. 2009. Основы термодинамики двухфазных потоков и их численное решение. Учебное пособие / В. А. Барилевич – Санкт-Петербург: Изд. Политехнического университета. – 425 с.

3. Басниев К. С. 1994. Энциклопедия газовой промышленности / Басниев К. С. – М.: ТВАНТ. – 884 с.

4. Бекиров Т. М. 1999. Технология обработки газа и конденсата / Т. М. Бекиров, Г. А. Ланчаков. – М.: Недра-Бизнесцентр. – 596 с.

5. Газорозподільні станції. Вузол редукування тиску газу. Методика розрахунку температури безгідратної експлуатації. – ДК „Укртрансгаз”, 2005 – 85 с.

6. Глушко В. П. 1979. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справ. изд. в 4-х т. / Л. В. Гурвич, И. В. Вейц, В. А. Медведев и др. // М.: Наука. – Т. II кн. 2 – 344 с.

7. Горбунов В. Н. 1984. Неравновесная конденсация в высокоскоростных потоках газа / Горбунов В. Н., Пирумов У. Г., Рыжов Ю. А. – М.: Машиностроение. – 200 с.

8. Гриценко А. И. 1999. Сбор и промысловая подготовка газа на Северных месторождениях России / А. И. Гриценко, В. А. Истомин, А. Н. Кульков, Р. С. Сулейманов. – М.: Недра. – 474 с.

9. Еремин В. В. 2005. Основы физической химии. Теория и задачи: учеб. пособие для вузов / Еремин В. В., Каргов С. И., Успенская И. А. и др. – М.: Экзамен. – 480 с.

10. Истомин В. А. 1990. Предупреждение и ликвидация газовых гидратов в системах сбора и промысловой обработки газа и нефти / В. А. Истомин – М.: ВНИИГАЗ. – 214 с.

11. Кошкин В. К. 1983. Термодинамическая теория стечения газов и паров, процесс дросселирования : программированное учебное пособие / В. К. Кошкин, Т. В. Михайлова. – М.: МАИ. – 53 с.

12. Коласс Рольф. Измерение влажности природного газа [Электронный ресурс] / Рольф Коласс, Крис Паркер // Режим доступа к статье: http://www.gazanaliz.ru/articles/Michell_Instruments_2003/Michell_Instruments.html.

13. Калашников О. В. 2001. К определению температуры гидратообразования во влажном природном газе / О. В. Калашников // Экотехнологии и ресурсосбережение. – № 3. – С. 10–13.

14. Кнауб Л. В. 2003. Газодинамические процессы в вихревых аппаратах / Л. В. Кнауб. – Одесса: Астропринт. – 276 с.

15. Козаченко А. Н. 1999. Эксплуатация компрессорных станций магистральных газопроводов / А. Н. Козаченко. – М.: Нефть и газ. – 463 с.

16. Кязимов К. Г. 1975. Эксплуатация и ремонт газовых сетей и оборудования / К. Г. Кязимов. – М.: Стройиздат. – 314 с.

17. Меркулов А. П. 1969. Вихревой эффект и его применение в технике / А. П. Меркулов. – М.: Машиностроение. – 184 с.

18. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням

стандартних звужувальних пристроїв. Частина 1. Принцип методу вимірювання та загальні вимоги (IDT; ISO 5167-1:2003, NEQ) : ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009. – [Чинний від 2010-04-01]. – К.: Держспоживстандарт України 2009. – 63 с. – (Національний стандарт України).

19. Пирумов У. Г. 1990. Газовая динамика сопел / У. Г. Пирумов, Г. С. Росляков. – М.: Наука. – с. 368.

20. Пистун Е. П. Определение коэффициента Джоуля-Томсона в задачах учета природного газа (XXVII международная научно-практическая конференция «Коммерческий учет энергоносителей») [Электронный ресурс] / Пистун Е. П., Матико Ф. Д., Масняк О. Я. // г. Санкт-Петербург – 6 с. – Режим доступа к тезисам: http://www.ieoe.com.ua/ieoe_site/news/Statti/Koef%20D-T.pdf

21. Редько А. 2013. Усовершенствование расчета газового эжектора для систем газоснабжения // А. Редько, Е. Бабенко // MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. – Lublin : Polish Academy of sciences. – Vol. 15. – № 6 – P. 19–26.

22. Соколов Е. Я. 1989. Струйные аппараты / Е. Я. Соколов, Н. М. Зингер. – М.: Энергоатомиздат. – 352 с.

23. Сычев В. В. 1979. Термодинамические свойства метана / [Сычев В. В., Вассерман А. А., Загорученко В. А. и др.] – М.: Издательство стандартов. – 348 с.

24. Успенский В.А. 1973. Струйные вакуумные насосы / В.А. Успенский, Ю.М. Кузнецов. – М.: Машиностроение. – 144 с.

25. Фотин Б. С. 1987. Поршневые компрессоры: Учебное пособие / Фотин Б. С., Пирумов И. Б., Прилуцкий И. К., Пластинин П. И. – Ленинград: Машиностроение. – 372 с.

26. Холодков В. В. 2003. Газодинамическая установка утилизации газовых выбросов узла одоризации газа: дис. кандидата техн. наук: 05.23.03 / Холодков Виктор Владимирович. – Харьков.– 160 с.

HYDRATE FORMATION IN GAS EJECTOR

Summary. In this article, attention is drawn to possibility of hydrate formation in a gas ejector. Recommendations for determining the circumstances of hydrateless ejector functioning are given. It is also about calculating energy losses in an ejector with a correction in case of loss of the hydrates and the outlet temperature considering humidity operating environment.

Key words: hydrate formation, gas humidity, real gas, ejector.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ РЕАГЕНТНОГО УДАЛЕНИЯ АММОНИЙНОГО АЗОТА ИЗ СТОЧНЫХ ВОД В ВИДЕ СТРУВИТА

Виктор Ковальчук

Национальный университет водного хозяйства и природопользования

Адрес: Украина, г. Ровно, ул. Соборная, 11

E-mail: kvant56@list.ru

Аннотация. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований технологии реагентного удаления аммонийного азота из сточных вод в виде струвита.

Ключевые слова: сточные воды, аммонийный азот, струвит, технология очистки сточных вод, влияние технологических параметров.

ВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается значительный рост требований к содержанию аммонийного азота в воде естественных водоемов. В частности, предельно допустимая концентрация аммонийного азота в водных объектах хозяйственно-питьевого и коммунально-бытового водопользования Украины составляет 2,0 мг/дм³, а в рыбохозяйственных объектах высшей, I-й и II-й категорий - 0,39 мг/дм³. Соблюдение таких жестких требований возможно только при условии повышения эффективности удаления соединений азота из сточных вод, сбрасываемых в водоемы.

Городские сточные воды характеризуются сравнительно невысокими концентрациями аммонийного азота, которые обычно находятся в пределах 15-60 мг/дм³. Удаление аммонийного азота из городских сточных вод успешно осуществляют путем биологической нитрификации-денитрификации. При этом чаще всего используют технологическую схему Людчака-Этингера с предварительной денитрификацией в специально устроенной аноксидной зоне, четырехступенчатый процесс BARDENPHO, процесс АЛЬФА и др. [7].

Однако для многих категорий промышленных сточных вод концентрация аммонийного азота в десятки и даже сотни раз превышает его содержание в городских сточных водах. Это, в частности, сточные воды предприятий химической и пищевой промышленности [10], животноводческих комплексов, гидролизно-дрожжевых и биохимических заводов, других предприятий (таблица 1).

Исследованиями НИИ ВОДГЕО установлено, что при концентрациях более 150 мг/дм³ аммонийный азот ухудшает процесс биологической очистки сточных вод в аэротенках, вызывая уменьшение скорости биохимического окисления загрязнений [1]. Влияние аммонийного азота на кинетику биохимического окисления происходит по закономерностям смешанного торможения, при котором степень торможения возрастает с уменьшением соотношения БПК:N в процессе

Таблица 1. Содержание аммонийного азота, характерное для некоторых категорий сточных вод

Table 1. Content of ammonia nitrogen, characteristic of certain categories of waste water

Название производства или технологического процесса	Концентрация аммонийного азота, г N/дм ³	
Анаэробное сбраживание осадков	0,6-0,8	[13]
Коксование угля	0,45-4,1	[18]
Нефтепереработка	0,02-0,9	[18]
Газификация угля	1-2,5	[18]
Производство удобрений	0,2-1	[18]
Производство синтетических волокон	0,8	[18]
Свинофермы	2,3	[18]
Фермы КРС	0,5-2,3	[18]
Переработка животных отходов	0,8	[18]
Перегонка вина	0,1-0,4	[18]
Производство взрывчатых веществ	1,5	[18]
Производство целлюлозы и бумаги	0,5	[18]
Производство стекла	0,3-0,65	[18]
Фармацевтическое производство	0,48	[18]
Гидролизно-дрожжевые заводы	0,9-1,7	[5]

биохимического окисления загрязнений. Вследствие этого затруднительно не только осуществление нитрификации аммонийного азота, но и также достижение показателей полной биологической очистки сточных вод. Это обстоятельство значительно усложняет возможность удаления аммонийного азота путем биологической нитрификации-денитрификации. Кроме этого, для некоторых из указанных в таблице 1 категорий сточных вод, характерно невысокое содержание органических веществ, что требует специального введения в сточные воды органического субстрата при денитрификации.

Указанные обстоятельства подчеркивают перспективность использования физико-химических методов удаления аммонийного азота из сточных вод.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Как показывает анализ современных исследований и публикаций, среди физико-химических методов удаления аммонийного азота наиболее приемлемым является реагентный метод, основанный на химическом взаимодействии аммонийного азота с солями магния и ортофосфорной кислоты и последующем его удалении из сточных вод в виде слаборастворимого струвита (ортофосфата магния-аммония) $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$.

Струвит, являющийся единственным слаборастворимым соединением, в состав которого входят сразу два биогенных элемента - азот и фосфор [4], вызывает значительный интерес возможностью их совместного удаления из сточных вод. Известны методы очистки промышленных сточных вод, содержащих ортофосфаты, введением в них солей магния и аммиачной воды с последующим отделением образующегося струвита [17, 20, 21]. Интенсивно развивается и находит распространение метод кристаллизации струвита из сточных вод и даже из мочевины, которая собирается отдельно от фекалий [19]. Однако наиболее перспективным может быть удаление аммонийного азота в виде струвита с высококонцентрированных по его содержанию сточных вод. Целесообразность рассматриваемого метода удаления аммонийного азота из сточных вод подчеркивает то обстоятельство, что струвит является ценным минеральным удобрением [11]. Однако известные разрозненные результаты не раскрывают сути процесса и поэтому не могут быть взяты за основу при разработке технологии реагентного удаления аммонийного азота, которая требует также проверки на реальных сточных водах.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью настоящих исследований была разработка и анализ эффективности технологии реагентного удаления аммонийного азота в виде струвита из высококонцентрированных по его содержанию сточных вод.

На основании поставленной цели были сформулированы следующие задачи исследований:

1. Теоретические исследования влияния различных технологических параметров на процесс образования струвита в сточных водах.

2. Исследование эффективности технологии реагентного удаления аммонийного азота в виде

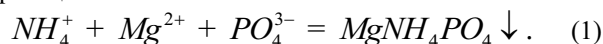
струвита из реальных сточных вод в лабораторных условиях.

3. Проверка эффективности технологии очистки сточных вод с удалением аммонийного азота в виде струвита на действующих очистных сооружениях.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Закономерности процесса реагентного удаления аммонийного азота могут быть установлены на основе анализа характера взаимодействия между ионами NH_4^+ , Mg^{2+} и PO_4^{3-} . При этом должны обязательно учитываться процессы гидролиза и диссоциации продуктов гидролиза этих ионов.

Образование струвита происходит согласно реакции:



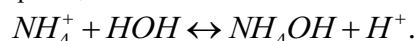
Выделение струвита в виде твердой фазы будет происходить, когда окажется превышено его произведение растворимости:

$$IP = f_I [NH_4^+] \cdot f_{II} [Mg^{2+}] \cdot f_{III} [PO_4^{3-}], \quad (2)$$

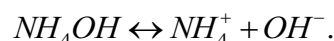
где f_I , f_{II} , f_{III} - коэффициенты активности соответственно одно-, двух- и трехвалентных ионов; $[NH_4^+]$, $[Mg^{2+}]$, $[PO_4^{3-}]$ - концентрация ионов в растворе, г-ион/дм³.

В условиях установившегося химического равновесия в растворе содержатся ионы NH_4^+ , Mg^{2+} , PO_4^{3-} , а также продукты их гидролиза.

Гидролиз ионов аммония происходит согласно реакции:



Продукты гидролиза диссоциируют по уравнению:



Константа диссоциации (для 25 °С) составляет [4]:

$$\frac{f_I [NH_4^+] \cdot f_I [OH^-]}{[NH_4OH]} = 1,8 \cdot 10^{-5}. \quad (3)$$

Общее содержание ионов аммония и продуктов его гидролиза в растворе X_p составит:

$$X_p = [NH_4^+] + [NH_4OH]. \quad (4)$$

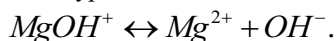
После преобразования уравнений (3) и (4) получим:

$$\beta_1 = \frac{[NH_4^+]}{X_p} = \frac{1,8 \cdot 10^{-5}}{1,8 \cdot 10^{-5} + f_I^2 [OH^-]}. \quad (5)$$

Гидролиз ионов магния происходит в соответствии с реакцией:



Продукты гидролиза, в свою очередь, диссоциируют по уравнению:



Из выражения для константы нестойкости комплексного иона $MgOH^+$ (для 25 °С) получим [7]:

$$\frac{f_{II}[Mg^{2+}] \cdot f_I[OH^-]}{f_I[MgOH^+]} = 2,63 \cdot 10^{-3}. \quad (6)$$

Общее содержание ионов магния и продуктов его гидролиза в растворе Y_P составит:

$$Y_P = [Mg^{2+}] + [MgOH^+]. \quad (7)$$

Из выражений (6) и (7) получим:

$$\beta_2 = \frac{[Mg^{2+}]}{Y_P} = \frac{2,63 \cdot 10^{-3}}{2,63 \cdot 10^{-3} + f_{II}[OH^-]}. \quad (8)$$

Ортофосфорная кислота диссоциирует в три ступени:

$$K_1 = \frac{f_I[H^+] \cdot f_I[H_2PO_4^-]}{[H_3PO_4]}, \quad (10)$$

$$K_2 = \frac{f_I[H^+] \cdot f_{II}[HPO_4^{2-}]}{f_I[H_2PO_4^-]}, \quad (11)$$

$$K_3 = \frac{f_I[H^+] \cdot f_{III}[PO_4^{3-}]}{f_{II}[HPO_4^{2-}]}. \quad (12)$$

После преобразований выражений (10), (11) и (12) получим выражение (13).

Обозначим общее содержание аммонийного азота, магния и фосфатов после введения реагентов в сточные воды символами X , Y , Z , а их содержание в осадке струвита символами X_{TB} , Y_{TB} , Z_{TB} . Эффективность извлечения аммонийного азота, магния и фосфатов в долях единицы в этом случае можно определить с выражений:

$$\alpha_1 = \frac{X_{TB}}{X}; \alpha_2 = \frac{Y_{TB}}{Y}; \alpha_3 = \frac{Z_{TB}}{Z}. \quad (14)$$

Для осадка струвита справедливы отношения

$$\left. \begin{aligned} \frac{X_{TB}}{Y_{TB}} = \frac{\alpha_1 X}{\alpha_2 Y} = 1 \\ \frac{X_{TB}}{Z_{TB}} = \frac{\alpha_1 X}{\alpha_3 Z} = 1 \end{aligned} \right\} \text{откуда} \quad \left. \begin{aligned} \alpha_2 = \alpha_1 \frac{X}{Y} = \frac{\alpha_1}{n_Y} \\ \alpha_3 = \alpha_1 \frac{X}{Z} = \frac{\alpha_1}{n_Z} \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

где n_Y и n_Z - соответственно, содержание магния и фосфатов в сточных водах, выраженное в долях от концентрации, стехиометрической к исходной концентрации аммонийного азота X .

$$\beta_3 = \frac{[PO_4^{3-}]}{Z_P} = \frac{K_1 K_2 K_3 \cdot f_I f_{II}}{K_1 K_2 K_3 \cdot f_I f_{II} + K_1 K_2 \cdot f_I^2 f_{III} [H^+] + K_1 \cdot f_I^2 [H^+]^2 + f_I^4 f_{II} f_{III} [H^+]^3}. \quad (13)$$

С учетом выражений (14) и (15) можно записать:

$$\left. \begin{aligned} X_P &= (1 - \alpha_1) \cdot X \\ Y_P &= n_Y \left(1 - \frac{\alpha_1}{n_Y}\right) \cdot X \\ Z_P &= n_Z \left(1 - \frac{\alpha_1}{n_Z}\right) \cdot X \end{aligned} \right\}. \quad (16)$$

Умножив левые и правые части выражений (5), (8), (13) и выполнив несложные преобразования с учетом выражений (2) и (16), получим в неявном виде уравнение:

$$(1 - \alpha_1) \left(1 - \frac{\alpha_1}{n_Y}\right) \left(1 - \frac{\alpha_1}{n_Z}\right) = \frac{PP}{X^3 \cdot n_Y n_Z \cdot \beta_1 \beta_2 \beta_3 \cdot f_I f_{II} f_{III}}. \quad (17)$$

Уравнения (5), (8), (13), (17), описывающие состояние установившегося химического равновесия, позволяют оценить влияние технологических параметров на эффективность процесса реагентного удаления аммонийного азота (α_1): начальной концентрации аммонийного азота в очищаемых сточных водах (X), доз магния и фосфатов, вводимых в сточные воды (n_Y и n_Z), pH сточных вод (через коэффициенты β_1 , β_2 , β_3), температуры сточных вод (через произведение растворимости PP).

Влияние величины pH проявляется в изменении количества ионов аммония, магния и фосфатов, находящихся в равновесии с осадком струвита.

Для определения оптимальной, с точки зрения удаления аммонийного азота, величины pH, предположим, что в сточных водах содержатся стехиометрические количества магния и фосфатов ($n_Y = n_Z = 1$). В этом случае уравнение (17) можно записать в виде:

$$\alpha_1 = 1 - \frac{1}{X} \sqrt[3]{\frac{PP}{\beta_1 \beta_2 \beta_3 \cdot f_I f_{II} f_{III}}}. \quad (18)$$

На рисунке 1 изображены зависимости эффективности удаления аммонийного азота от величины pH, полученные по уравнению (18). Расчеты выполнены для концентраций аммонийного азота 500 и 1000 мг/дм³. Значение других величин приняты для температуры 25 °С по справочной литературе [4]: произведение растворимости струвита $PP = 2,5 \cdot 10^{-13}$; константы диссоциации

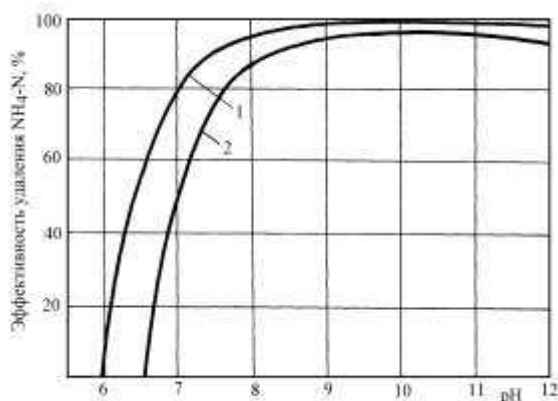


Рис. 1. Расчетная эффективность удаления аммонийного азота при различных значениях pH и исходных концентрациях в сточных водах аммонийного азота: 1 - 500 мг/дм³, 2 - 1000 мг/дм³

Fig. 1. The estimated efficiency of ammonium nitrogen removal at different pH values and initial concentrations of ammonia nitrogen in wastewater: 1 - 500 mg/dm³, 2 - 1000 mg/dm³

ортофосфорной кислоты $K_1 = 7,6 \cdot 10^{-3}$, $K_2 = 6,2 \cdot 10^{-8}$, $K_3 = 4,4 \cdot 10^{-13}$. Значения коэффициентов β_1 , β_2 , β_3 определяли по формулам (5), (8) и (13). Значения коэффициентов активности вычисляли по формуле Дебая-Гюккеля [12]:

$$\lg f = -\frac{0,511 \cdot d^2 \sqrt{\mu}}{1 + 1,5 \sqrt{\mu}} + 0,2 \mu d^2, \quad (19)$$

где: d - валентность иона; μ - ионная сила.

Ионную силу определяли по формуле:

$$\mu = 0,5 \sum_{i=1}^N C_i \cdot d_i^2, \quad (20)$$

где: C_i - концентрация ионов, г-ион/дм³.

При определении ионной силы учитывались не только ионы, содержащиеся в сточных водах, но и ионы, вносимые в сточные воды в виде реагентов.

Анализ полученных результатов показывает, что максимальная эффективность удаления аммонийного азота должна достигаться при pH 9,5-11 [8]. Однако, учитывая существующие требования, согласно которым ограничивается величина pH сточных вод, поступающих на биологическую очистку, следует считать целесообразным осуществлять удаление аммонийного азота при pH 8,0-8,5. При этом эффективность удаления аммонийного азота, по сравнению с максимальной, уменьшится на 4-10 %.

Как следует из уравнения (2) для произведения растворимости слаборастворимого струвита, с увеличением концентрации в растворе ионов $[Mg^{2+}]$ и $[PO_4^{3-}]$ будет уменьшаться

остаточная концентрация ионов $[NH_4^+]$, то есть возрастает эффективность удаления аммонийного азота из сточных вод. Однако, увеличение количества магния и фосфатов, принимающих участие в образовании струвита, приведет к одновременному росту их остаточных концентраций в сточных водах. Особенно нежелательным является в этом случае увеличение остаточных концентраций фосфатов, которые создают опасность эвтрофикации при сбросе очищенных сточных вод в водоемы.

Определение доз реагентов, при которых будет обеспечиваться максимальная эффективность удаления аммонийного азота при минимальных остаточных концентрациях фосфатов, осуществляли на основе полученного уравнения 13 при исходной концентрации аммонийного азота 500 мг/дм³.

Анализ характера полученных расчетных зависимостей, как и предполагалось, показывает (рисунок 2), что увеличение количества магния и фосфатов, принимающих участие в реакции образования струвита, повышает эффективность удаления аммонийного азота. При стехиометрических дозах магния и фосфатов эффективность удаления аммонийного азота составляет 86,3 %. Одновременное увеличение доз магния и фосфатов до 150 % от стехиометрических увеличивает эффективность его удаления до 98,5 %, а уменьшение до 50 % от стехиометрических - уменьшает эффективность до 49 %. Теоретическая зависимость, изображенная на рисунке 3, показывает, что при этом остаточные концентрации фосфатов уменьшаются при уменьшении их дозы и одновременном росте дозы магния. Таким образом, необходимо говорить о решении оптимизационной задачи определения доз реагентов, при которых, во-первых, будет обеспечиваться необходимая эффективность удаления аммонийного азота и, во-вторых, остаточные концентрации фосфатов не будут превышать какого-то заранее установленного значения.

Расчеты оптимальных доз реагентов осуществляли на примере сточных вод свиноводческих комплексов. С последнего уравнения системы (16) определяли количество фосфатов, при котором достигается заданная эффективность удаления аммонийного азота α_1 , а остаточные концентрации фосфатов составляют Z_p :

$$n_z = \alpha_1 + \frac{Z_p}{X}. \quad (21)$$

Учитывая, что суточное количество аммонийного азота и фосфатов (PO_4^{3-}), содержащихся в неочищенных сточных водах свиноводческих комплексов, в расчете на одно животное составляет соответственно 0,018 и 0,023 кг [15], уравнение (21) можно записать в виде

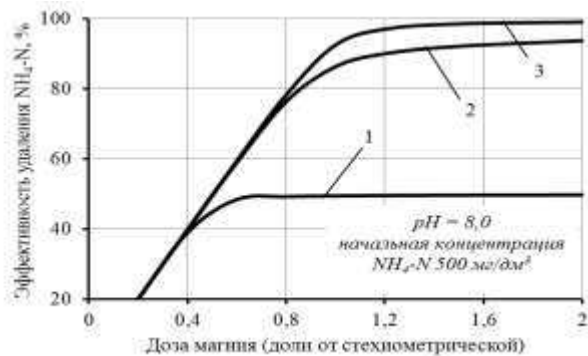


Рис. 2. Расчетная зависимость эффективности удаления аммонийного азота от дозы магния при дозах фосфатов: 1 – 50 %; 2 – 100 %; 3 – 150 % от стехиометрической

Fig. 2. Calculated dependence of the ammonia nitrogen removal efficiency of doses of magnesium in phosphate doses: 1 - 50%; 2 - 100%; 3 - 150% of the stoichiometric

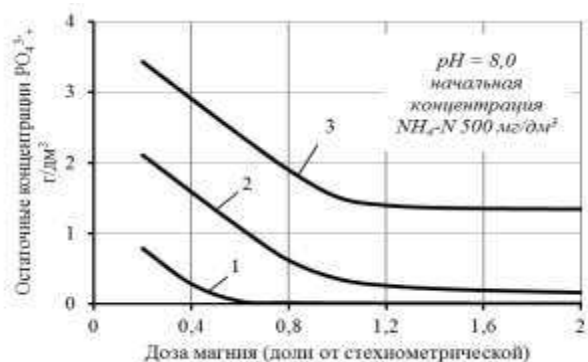


Рис. 3. Расчетная зависимость остаточных концентраций фосфатов от дозы магния. Дозы фосфатов: 1 – 50 %; 2 – 100 %; 3 – 150 % от стехиометрической

Fig. 3. Calculated dependence of residual concentrations of phosphate doses of magnesium. Doses phosphates: 1 - 50%; 2 - 100%; 3 - 150% of the stoichiometric

$$n_z = 0,24(1 - E_z) + \alpha_1, \quad (22)$$

где: E_z - эффективность удаления фосфатов по сравнению с их первоначальным содержанием в сточных водах, доли единицы.

Решение уравнения (17) при дозах фосфатов, определенных по уравнению (22), позволяет получить необходимую в этом случае дозу магния. Из рисунка 4 видно, что при заданной эффективности удаления аммонийного азота снижение остаточных концентраций фосфатов может быть достигнуто увеличением дозы магния.

Для практического применения метода реагентного удаления аммонийного азота важно знать оптимальное соотношение между количествами фосфатов и магния, вводимых в сточные воды. Эти данные могут быть получены на основе анализа кривых, полученных расчетным путем по уравнениям (17) и (22). Для области

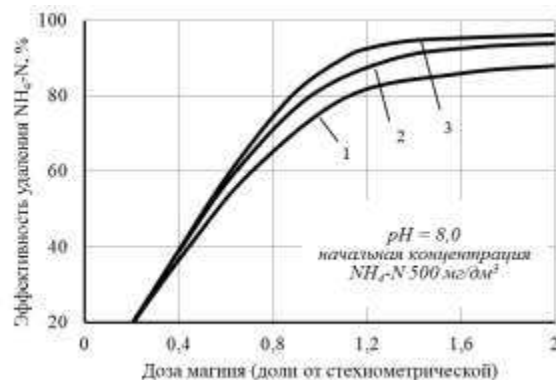


Рис. 4. Расчетная зависимость эффективности удаления аммонийного азота от дозы магния при снижении концентрации фосфатов (по сравнению с их исходным содержанием): 1 - на 80 %; 2 - на 50 %; 3 - на 0 %

Fig. 4. The calculated dependence of the ammonia nitrogen removal efficiency of magnesium doses with a decrease of phosphate concentrations (as compared with their initial content): 1 - 80 %; 2 - 50 %; 3 - 0 %

высокой эффективности удаления аммонийного азота (60-90 %) и низких остаточных концентраций фосфатов ($E_z = 80$ %) характерно отношение вводимых количеств фосфатов и магния в пределах 1,5-3,5 г/г (рисунок 5).

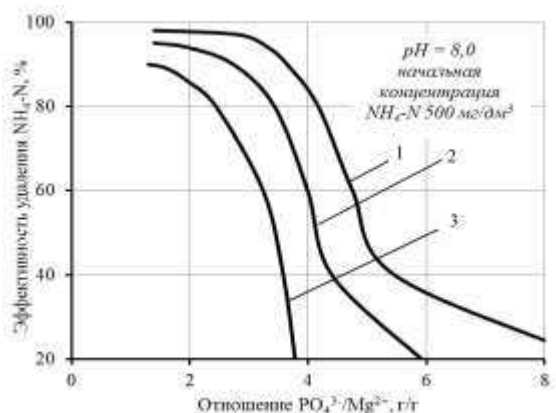


Рис. 5. Расчетная зависимость эффективности удаления аммонийного азота от величины массового отношения PO_4^{3-}/Mg^{2+} при заданной эффективности удаления фосфатов: 1 – 0 %; 2 – 50 %; 3 – 80%

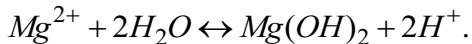
Fig. 5. The calculated dependence of the ammonia nitrogen removal efficiency of the PO_4^{3-}/Mg^{2+} mass ratio values at a given phosphate removal efficiency: 1 – 0 %; 2 – 50 %; 3 – 80 %

Для удаления аммонийного азота из сточных вод наиболее целесообразно использовать реагенты, широко выпускаемые промышленностью: хлористый и сернокислый магний, оксид магния, динатрийфосфат и суперфосфат [9].

Динатрийфосфат и суперфосфат являются кислыми солями ортофосфорной кислоты, а поэтому

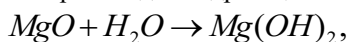
при их применении будет происходить подкисление сточных вод.

Гидролиз хлористого и сернокислого магния, как солей слабого основания и сильных кислот, происходит с образованием основной соли и свободной кислоты:

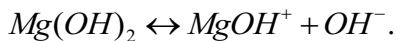


Таким образом, при гидролизе хлористого и сернокислого магния, динатрийфосфата и суперфосфата будет происходить подкисление сточных вод. Для проведения процесса реагентного удаления аммонийного азота при оптимальных величинах рН среды 8-8,5 в этом случае необходимо подщелачивать сточные воды.

Гидролиз слаборастворимого оксида магния происходит в два этапа [3]. Сначала на поверхности оксида магния происходит гидратация:



после чего гидроксид магния диссоциирует по схеме:



Удерживаемые на поверхности ионы гидроксила взаимодействуют с анионами, присутствующими в воде, прежде всего, с CO_3^{2-} , HCO_3^- , HPO_4^{2-} , $H_2PO_4^-$, что приводит к повышению рН и увеличению концентрации ионов магния.

Таким образом, применение оксида магния создает предпосылки для проведения процесса удаления аммонийного азота без использования подщелачивающих реагентов. Следует ожидать, что эффективность процесса реагентного удаления аммонийного азота в значительной степени зависит от загрязненности очищаемых сточных вод. К такому выводу можно прийти, если принять во внимание ингибирующее влияние растворимых органических веществ на процессы кристаллизации [16]. Кроме этого, увеличение загрязненности сточных вод вызывает ухудшение гидродинамической обстановки вблизи поверхности кристаллов, что затрудняет процесс переноса молекул струвита к их поверхности [14].

Рассматривая влияние на эффективность удаления аммонийного азота ионов, содержащихся в сточных водах, следует выделить ион кальция, концентрация которого будет значительно возрастать при применении в качестве одного из реагентов суперфосфата. При рН выше 7,4 в сточных водах образовываться труднорастворимый гидрооксифосфат кальция, произведение растворимости которого составляет $1,6 \cdot 10^{-58}$ [16]. Образование гидрооксифосфата кальция может уменьшаться в результате связывания части кальция в другое слаборастворимое соединение - карбонат кальция, произведение растворимости которого составляет $4,8 \cdot 10^{-9}$ [16]. Очевидно, что в сточных водах одновременно происходят рассмотренные

выше реакции, соотношение между которыми определяется величиной рН, концентрациями ионов и значениями произведения растворимости струвита, гидрооксифосфата и карбоната кальция.

Как показали лабораторные исследования, выполненные на реальных сточных водах шести свиноводческих комплексов, максимальная эффективность реагентного удаления аммонийного азота достигается при рН 9,0-11 (рисунок 6), что подтверждает правильность предположений, взятых за основу при теоретическом анализе основных закономерностей процесса. При уменьшении рН до 8,0-8,5 эффективность удаления аммонийного азота по сравнению с максимальной снижается на 2-7 %.

Результаты опытов с различными комбинациями реагентов подтвердили целесообразность использования для удаления аммонийного азота оксида магния и суперфосфата. Однако при этом существенное значение имеет порядок введения реагентов. Наилучшие результаты достигаются при введении в первую очередь оксида магния, его гидролиза в течение 2-2,5 ч, после чего следует непрерывно в течение 2-2,5 ч медленно вводить суперфосфат. Это позволяет достичь максимальной эффективности удаления аммонийного азота 85-90 % (рисунок 7) и получить осадок с хорошими седиментационными свойствами. Оптимальное массовое соотношение PO_4^{3-} / Mg^{2+} для этих реагентов составляет 2,25 г/г. Уменьшение концентраций фосфатов по сравнению с их содержанием в неочищенных сточных водах при этом составляет 30-85 %.

Производственные исследования метода реагентного удаления аммонийного азота были проведены на свиноводческом комплексе «Калитянский» Киевской области [6, 8, 9]. Установлено, что одновременно с удалением аммонийного азота и фосфатов происходит значительное уменьшение значений ХПК, БПК_{полн} и БПК₅ сточных вод (таблица 2). Осветленные сточные воды имеют низкое содержание взвешенных веществ (менее 150 мг/дм³), они прозрачны с небольшим желтоватым оттенком и слабым запахом. В процессе реагентной обработки в сточных водах увеличиваются отношения БПК₅/ХПК и БПК_{полн}/ХПК, более благоприятным для нормальной жизнедеятельности активного ила становится соотношение БПК:N:P, создаются лучшие условия для последующей биологической очистки сточных вод. Наряду с уменьшением концентраций взвешенных веществ при реагентной обработке наблюдается некоторое уменьшение (около 20 %) ХПК фильтрованных проб, что свидетельствует об удалении из сточных вод части растворимых и коллоидных загрязнений.

Уплотнения осадка, образующегося при реагентной обработке сточных вод свиноводческих комплексов, практически заканчивается в течение 2 часов, при этом его влажность составляет 90,8-93,5 %. Осадок имеет низкое удельное сопротивление

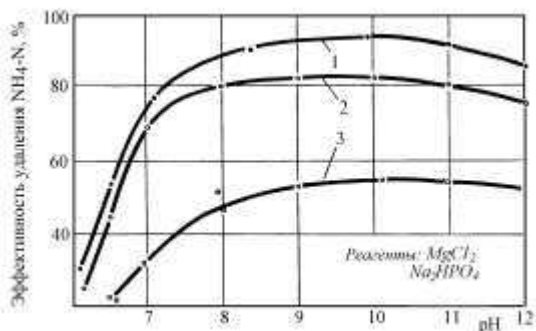


Рис. 6. Влияние величины pH на эффективность удаления аммонийного азота при его исходных концентрациях в сточных водах свиноводческих комплексов: 1 - 1145 мг/дм³; 2 - 675 мг/дм³; 3 - 500 мг/дм³. Дозы реагентов: 1, 2 – 150 %, 3 – 100 % от стехиометрической

Fig. 6. Effect of pH on ammonium nitrogen removal efficiency from pig farms wastewater with its initial concentration: 1 - 1145 mg/dm³; 2 - 675 mg/dm³; 3 - 500 mg/dm³. Doses of reagents: 1, 2 – 150 %, 3 – 100 % of the stoichiometric

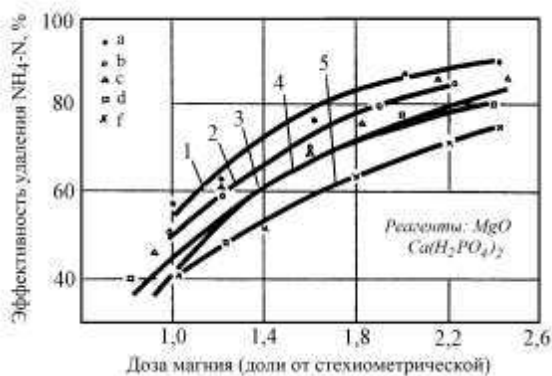


Рис. 7. Влияние дозы магния на эффективность удаления аммонийного азота при ХПК очищаемых сточных вод свиноводческих комплексов: 1 - 4,13 г/дм³; 2 - 7,65 г/дм³; 3 - 9,79 г/дм³; 4 - 11,63 г/дм³; 5 - 18,87 г/дм³. Исходные концентрации аммонийного азота: а - 430 мг/дм³; б - 490 мг/дм³; с - 540 мг/дм³; d - 610 мг/дм³; е - 820 мг/дм³

Fig. 7. Effect of magnesium doses on ammonia nitrogen removal efficiency in pig farms wastewater COD: 1 - 4,13 g/dm³; 2 - 7,65 g/dm³; 3 - 9,79 g/dm³; 4 - 11,63 g/dm³; 5 - 18,87 g/dm³. Initial ammonium nitrogen concentrations: а - 430 mg/dm³; б - 490 mg/dm³; с - 540 mg/dm³; d - 610 mg/dm³; е - 820 mg/dm³

фильтрации $(8-80) \cdot 10^{10}$ см/г. Иловая вода, отделяемая от осадка, по своему качеству не отличается от осветленных сточных вод. Агрономический анализ проб осадка показал высокое содержание в нем биогенных элементов (в процентах массы сухого вещества): азот - 5,4-6,56; фосфор - 9,54-10,42; калий - 0,94-1,5. Зольность осадка составила 60,3-71,2 %. Полученные данные убедительно подтверждают целесообразность использования осадка, получаемого при реагентной

Таблица 2. Эффективность реагентной очистки сточных вод свиноводческого комплекса при использовании оксида магния и суперфосфата
Table 2. Efficiency of pig farms reagent wastewater treatment using magnesium oxide and superphosphate

Показатели качества воды, мг/дм ³	Неочищенные сточные воды	Сточные воды после реагентной обработки и отстаивания
pH	7,1	8,9
Взвешенные вещества	<u>4468 - 17358</u> 9997	<u>16 - 172</u> 112
ХПК	<u>9120 - 24662</u> 13903	<u>1223 - 3099</u> 2039
БПК ₅	<u>2317 - 11000</u> 5689	<u>953 - 2250</u> 1463
Азот аммонийный	<u>507-578</u> 539	<u>92-187</u> 144
Фосфаты	<u>47-217</u> 108	<u>50-99</u> 68

Примечание. Над чертой указаны минимальные и максимальные значения показателей, под чертой - средние

обработке сточных вод свиноводческих комплексов, в качестве органоминерального удобрения.

Специальные исследования, выполненные на сточных водах Николаевского гидролизно-дрожжевого и Бендерского биохимического заводов, показали возможность эффективного удаления аммонийного азота и других загрязнений также из этих категорий сточных вод [5].

Высокая эффективность метода реагентного удаления аммонийного азота в виде струвита позволила разработать на его основе ряд технологий очистки сточных вод. В частности, технология очистки сточных вод свиноводческих комплексов предусматривает обработку реагентами и первичное осветления сточных вод, двухступенчатую биологическую очистку, подщелачивание биологически очищенных сточных вод известью с последующим осветлением, нейтрализацию очищенных сточных вод кислотой и обеззараживания хлором [2, 15].

ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных исследований доказана возможность и целесообразность применения для очистки сточных вод с высоким содержанием аммонийного азота технологии реагентного удаления аммонийного азота, основанной на его переводе в слаборастворимое соединение $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ - струвит, с последующим удалением его из сточных вод отстаиванием.

2. Установлены основные закономерности процесса реагентного удаления аммонийного азота из сточных вод, оценено влияние основных технологических параметров процесса на его эффективность

3. Определены оптимальные значения технологических параметров, изучены особенности и эффективность применения ряда реагентов, сделан вывод о целесообразности использования для удаления аммонийного азота из сточных вод оксида магния и суперфосфатата.

4. Производственные экспериментальные исследования подтвердили высокую эффективность технологии реагентного удаления аммонийного азота из сточных вод свиноводческих комплексов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биологическая очистка производственных сточных вод: Процессы, аппараты и сооружения. 1985 / С.В.Яковлев, И.В.Скирдов и др.; Под ред. С.В.Яковлева. – М.: Стройиздат. – 208.
2. ВНТП-СГіП-46-9.84. 1994. Системы видалення, обробки, підготовки та використання гною; введ. 1994-07.01. – К.: Мінсільгосппрод України. – 36.
3. Водоподготовка. Процессы и аппараты: Учеб. Пособие для вузов. 1977 / Под ред. докт. техн. наук, проф. И.О. Мартыновой. – М.: Атомиздат, – 349.
4. Гороновский И.Т. 1987. Краткий справочник по химии / Гороновский И.Т., Назаренко Ю.П., Некряч Е.Ф.; под общ. ред. А.Т. Пилипенко. – 5-е изд., перераб. и доп. – К.: Наукова думка. – 829.
5. Громозова Е.Н. 1990. Перспективы использования дрожжевых грибков в обработке последрожжевой бражки / Е.Н.Громозова, В.С.Подгорский, О.П.Синев, В.А.Ковальчук // Химия и технология воды, № 8. – 342-347.
6. Ковальчук В.А. 1989. Технология физико-химической и биологической очистки сточных вод свиноводческих комплексов с предварительным удалением аммонийного азота : автореф. дис. ...канд. техн. наук. – М. – 23.
7. Ковальчук В.А. 2002. Очистка стічних вод: Навчальний посібник для студентів вузів. – Рівне: Рівненська друкарня. – 622.
8. Ковальчук В.А. 2011. Теоретичне дослідження впливу величини рН на ефективність реагентного видалення амонійного азоту із стічних вод / В.А. Ковальчук // Коммунальное хозяйство городов: науч.-техн. сб. – К.: Техніка, Вып. 101. – 132-138.
9. Ковальчук В.А. 2012. Теоретичне дослідження впливу доз та типу реагентів на ефективність видалення амонійного азоту із стічних вод / В.А.Ковальчук // Коммунальное хозяйство городов: науч.-техн. сб. – К.: Техніка. Вып. 103. – 217-224.
10. Ковальчук В.А. 2013. Технология очистки сточных вод мясоперерабатывающих предприятий / В.А. Ковальчук // MOTROL, Lublin-Rzeszow, Vol. 13, No 6. – 109-116.
11. Комплексные удобрения: Справочное пособие. 1986 / Минеев В.Г., Грызлов В.П., Синдяшкіна Р.И. и др.; под ред. Минеева В.Г. – М.: Агропромиздат. – 252.
12. Лурье Ю.Ю. 1989. Справочник по аналитической химии: Справ. изд. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия. – 448.
13. Нездойминов В. 2011. Новая экологически безопасная технология утилизации осадков / В. Нездойминов, В. Чернышев // MOTROL, Lublin, Vol. 13С. – 17-23.
14. Романков П.Г. 1975. Массообменные процессы химической технологии / П.Г. Романков, Н.Б. Рашковская, В.Ф. Фролов. – Л.: Химия. – 333.
15. Системи видалення, обробки, підготовки та використання гною: ВНТП-АПК-09.09. 2006. – К.: Міністерство аграрної політики України. – 100.
16. Химия промышленных сточных вод. 1983 / Под ред. А. Рубина. Пер. с англ. – М.: Химия. – 360.
17. Burns, R.T. 2003. Optimization of Phosphorus Precipitation from Swine Manure Slurries to Enhance Recovery / R.T. Burns, M.I. Celen, J.R. Buchanan // Water Science and Technology, Vol. 48(1). – 139-146.
18. Moussa V.S. 2004. Nitrification in Saline Industrial Wastewater: Dissertation for The Degree Doctor of Philosophy. – Delft University. – 176.
19. Ronteltap M. 2009. Phosphorus recovery from source-separated urine through the precipitation of struvite: Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in Swiss Federal Institute of Technology. – Zurich. – 111.
20. Suzuki K. 2007. Removal and recovery of phosphorous from swine wastewater by demonstration crystallization reactor and struvite accumulation device / K. Suzuki, Y. Tanaka, K. Kuroda, D. Hanajima, Y. Fukumoto // Bioresource Technology, Vol. 98. – 1573–1578.
21. Uludag, D.S. 2005. Ammonia Removal from Anaerobical Digested Dairy Manure by Struvite Precipitation / D.S. Uludag, G.N. Demirer, S. Chen // Process Biochemistry, Vol. 40. – 3667–3674.

THE RESEARCH OF THE EFFECTIVENESS OF REAGENT TECHNOLOGY AMMONIUM NITROGEN REMOVAL FROM WASTEWATER AS A STRUVITE

Summary. The results of theoretical and experimental studies of technology reagent ammonium nitrogen removal from wastewater as struvite presented.

Key words: wastewater, ammonia nitrogen, struvite, wastewater treatment technology, the impact of technological parameters.

LABYRINTH SCREW PUMP THEORY

Pavlo Andrenko and Anton Lebedev

National Technical University Kharkov Polytechnic Institute
Address: Ukraine, Kharkiv, 21 Frunze str.
E-mail: andrenko47@mail.ru

Summary. An analysis of existing methods of labyrinth screw pump design is presented. The physical model of its work process has been refined. An integrated method of calculating the flow characteristics of the pump has been developed. In contrast to known ones, it contains no empirical coefficients and takes into account the shape of the screw groove. New analytic expressions have been given for calculating instantaneous pump delivery and its irregularity coefficient. Dimensionless criteria have been offered to compare the characteristics of pumps with different shapes of the screw groove.

Keywords: labyrinth screw pump, characteristics, delivery, irregular delivery, screw groove shape, comparison criteria.

INTRODUCTION

The current level of technology and its further development is inextricably linked to intensifying the operation of units and hydraulic systems, increasing their performance and energy conservation. As regards labyrinth screw pumps (LSP) used widely for pumping corrosive media, heterogeneous and gas-liquid emulsions, allowing for high heads at low deliveries and working with low-viscosity corrosive liquids with a specific velocity of $n_s = 10..40$, which is particularly advantageous in comparison with centrifugal pumps, a topical task is developing a refined theory of the work process. Besides, these pumps are much easier to manufacture than vortex ones and are more reliable because mechanical friction of parts is absent.

ANALYSIS OF PUBLICATIONS

Currently, the number of theoretical studies in LSP is very limited. This is due to the novelty and complexity of pump hydrodynamic processes occurring therein. The vast majority of studies dealing with the work process in labyrinth screw channels are dedicated to the seal [1]. Study [2] discusses the work process in a labyrinth seal in the laminar regime, which was represented as two screw seals. The illegality of such analysis of the work process in a labyrinth screw seal was proved experimentally [3].

When considering the turbulent flow in an LSP [4], the primary differential equations used were Reynolds equations for turbulent flow without convective inertial terms that do not reflect the physics of processes. In addition, the theory expresses the average velocity in the form of power expansions for a stepwise radial coordinate with coefficients that can be determined only experimentally. In deriving the dependence of the pressure drop on the delivery, the authors used the equation of change of momentum in the pump groove. The result is a linear dependence of the pump head on delivery, this being in poorer agreement with experiment than the quadratic one [3].

Study [3] investigates LSP performance with a gas-liquid mixture. It presents the methodology for calculating the characteristics of an LSP working with a gas-liquid emulsion. The study mentions good agreement of theoretical calculations with experimental data; however, experimental results are not shown. In conducting experimental studies, gas and liquid are fed to the pump through separate ports (a vessel, in which they are mixed, is absent). This does not meet actual pump operating conditions. It is noted that the developed method needs to be rectified through the development and experimental investigation of such pumps. The maximum concentration of gas in the gas-liquid mixture, which the pump is able to deliver, has not been evaluated. No universal criteria for evaluating pump performance have been developed.

Work [5] compares the experimental characteristics of LSP and vortex pumps, and notes their similarity. On this basis, an attempt was made to consider the LSP work process, using the equation of angular momentum as this was done for the vortex pump [6]. However, in constructing the $H(q)$ curve with this method, one needs to know two experimental factors, and the resulting experimental characteristic is a straight line, which is not true. Studies [3, 7] describe the work process and give the LSP design methodology. In describing the work process, the fluid flow in the pump is considered as flow of fluid between the developments of the screw and sleeve surfaces moving in opposite directions at a rotational speed equal to half the angular speed of the screw. The assumption is that the friction force occurring in the liquid forms pressure and friction forces (turbulent ones) on the protrusions of the screw and the sleeve. When building the $H(q)$ characteristics with this method, the pump head coefficient is determined experimentally, and this limits the scope of the method being considered.

Work [8] proposes a new efficiency factor to analyse the effectiveness of hydraulic systems that take into account the power loss in such systems. Ways of improving pump delivery and reducing losses in the hydraulic system are considered. However, the proposed criteria are not suitable for analysing and comparing the

characteristics of LSP with working members of various shapes.

An important characteristic of pumps, including LSP, is their irregular delivery determined by the irregular delivery factor [9]:

$$\delta_i \approx \delta_{t,i} + \delta_{s,i}, \quad (1)$$

where: $\delta_{s,H}$ is irregular delivery factor conditioned by compression of the working fluid (WF) in the cells of the pump during its transfer from the suction space to the decreasing one; $\delta_{t,H}$ is theoretical irregular delivery factor [9]:

$$\delta_{t,H} = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{q_a}, \quad (2)$$

where: q_{\max} , q_{\min} and q_a are respectively the maximum, minimum and average theoretical pump discharge.

Note that $\delta_{s,H}$ is calculated by a dependence similar to that in (2). In most papers devoted to design of screw pumps, the theoretical irregular delivery factor is taken equal to zero, whereas it was not determined at all for the LSP.

Thus, we can say that, presently, all methods of LSP design are based on using empirical relationships, the physical work process model has not been studied thoroughly and ignores the hydraulic resistance at the inlet and outlet of the screw grooves, and the flow between the LSP grooves. Little attention is paid to studying and improving the flow parts of such pumps. Fluid flow in the flow parts of these pumps has not been studied. No analytical dependence for calculating instantaneous pump delivery exists, nor are there any universal criteria for evaluating characteristics of LSP.

The above-stated determines the relevance of the paper aimed at solving an important scientific and practical problem, viz. development of the theory of LSP design.

PHYSICAL MODEL OF THE LABYRINTH SCREW PUMP WORKING PROCESS

WF energy is transferred in the pump due to rotation of the screw relative to the sleeve, resulting in force interaction between the fluid flowing over the screw and that flowing over the sleeve. The sleeve screw tips intensify this process. The conventional interface surface area between the screw and sleeve experiences a growing turbulent friction force enhanced by the centrifugal forces caused by rotation of the screw and the vortices formed by non-stationary WF flow, as well as by the vortex resulting from fluid leakage through the radial clearance between the sleeve and the screw grooves. Liquid viscosity is manifested as diffusion of vortices. Note that the turbulent friction

forces and the vortices formation intensity depends directly on the geometrical parameters of the screw and sleeve, their clearance, the material properties (their roughness), the screw rotational speed and the parameters of the liquid being pumped.

Note that the nature of WF flow is not uniform over the entire length of the screw. The flow is formed at the groove inlet. Near the outlet, the flow pattern also changes because the groove opens. In any arbitrary cross section of the pump, the relative positions of the tips of the sleeve and screw threads periodically and continuously change. The frequency of change of tip positions - the main frequency of pulsations of the delivery rate in the given cross section - equals the product of screw rotational speed and the number of thread leads. This is confirmed by experimental studies of such pumps [3, 10].

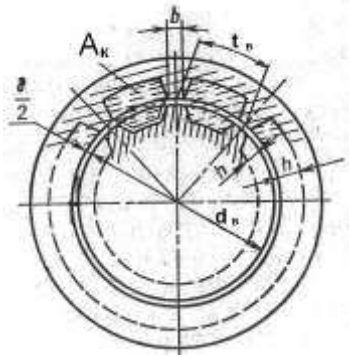
The friction forces occurring in the WF create pressure and friction forces on the tips of the screw and sleeve. With turbulent flow over the tips when the WF has relatively low viscosity, the main role is played by pressure forces perpendicular to the surface of thread tips. The components of this force in the axial direction determine the pump head.

Thus, during pump operation, the WF moves in two mutually opposite directions from pump inlet to its outlet (direct flow) in the screw grooves and is driven by rotation of the screw; from pump outlet to its inlet (reverse flow) through the clearance between the sleeve tip and the screw thread due to the pressure differential between the outlet and inlet of the pump, and the weight of the WF if the pump is mounted not horizontally.

PERFORMANCE OF THE LABYRINTH SCREW PUMP

In developing the methodology of LSP performance design, the authors relied on the physical model of the working process described above. The screw and sleeve were supposed to rotate in opposing directions. The centrifugal forces acting on the WF in the working space of the pump, which are proportional to the ratio of the pump flow section height and its mean radius, were neglected because of their small value. The WF flow in the groove was assumed quasistationary. Since the WF flow in the pump grooves is a developed turbulent one, it was considered stationary only relative to time-averaged velocity and pressure parameters and steady over a sufficiently long average period. Thus, the loss coefficient at the inlet and outlet of the pump and friction are determined by the same dependences as those for conventional hydraulic devices at steady-state fluid flow.

To simplify analysis of the pump work process, it was assumed that the screw and sleeve threads have the same shape and size, and are characterized by the hydraulic radius. The characteristic geometrical dimensions of the LSP are shown in Fig. 1.



t_b – screw groove pitch in the cross section; b – screw tip width in the cross section; δ – diameter clearance between the screw and sleeve threads

Fig. 1 Characteristic geometric dimensions of labyrinth screw pump (cross section)

t_b – шаг винтовой канавки в поперечном сечении; b – ширина вершук винта в поперечном сечении; δ – диаметральный зазор между нарезками винта и втулки

Рис. 1 Характерные геометрические размеры лабиринтно-винтового насоса (поперечное сечение)

According to the physical model of the LSP work process, its average discharge is determined by the following relationship:

$$q_a = z[q_1(n) - q_2(\Delta p_{vux})], \quad (3)$$

where: q_1 is discharge due to displacement of fluid volume in the screw groove of the pump for one revolution of the screw; q_2 is discharge due to flow of fluid in the groove of the pump through the clearance formed by the sleeve thread tip and screw groove space under the influence of the pressure differential across the inlet and outlet of the pump Δp_{vux} and gravity in case of a non-horizontal position of the pump.

To obtain a universal dependence of the average pump discharge on various shapes of its working members, their dimensions were determined by hydraulic radius R_g .

The discharge due to movement of fluid volume in the screw groove of the pump per revolution of the screw was determined by the relationship:

$$q_1(n) = k_{kw} A_k L_k \frac{n}{60}, \quad (4)$$

where: k_{kw} is a factor accounting for the actual volume of the screw channel:

$$k_{kw} = \frac{A_k L_k - A_k (4R_g + b) + \frac{4}{3} \pi (2R_g)^3}{A_k L_k}; \quad (5)$$

where: A_k is screw channel area, m^2 (Fig. 1):

$$A_k = 4\pi R_g^2, \quad (6)$$

L_k is helix length, m:

$$L_k = \sqrt{(\pi d_B)^2 + s_B^2}. \quad (7)$$

The discharge due to the flow of fluid in the groove of the pump through the clearance formed by the sleeve thread tip and the screw groove space was calculated with the formula:

$$q_2(\Delta p_{vux}) = \mu(Re) \left[\frac{A_k}{2} + \delta R_g \right] \sqrt{2g \left(\frac{p_{vux} - p_v}{\rho_c g} + h_{vt} + l_B \right)}, \quad (8)$$

where: h_{vt} is loss of pressure due to local resistances and friction in a channel formed by the sleeve thread tip and screw groove space found by relationship:

$$h_{vt} = \left(\lambda(Re) \frac{L_k}{4R_g} + \zeta_v + \zeta_{vux} + k_{ot} \zeta_{otv} \right) \frac{v_{ser.vux}^2}{2g} \quad (9)$$

where: $v_{ser.vux}$ is average WF velocity in the screw channel at the pump outlet found by relationship:

$$v_{ser.vux} = \frac{q_{ser}}{z A_k}. \quad (10)$$

Note that, in formula (8) and in the sequel, the value of l_B , the screw length, was substituted if the pump position was not horizontal.

In formulas (8) and (9), the following notation was used: $\mu(Re)$ is loss coefficient in the clearance formed by the sleeve thread tip and screw groove space, which were determined based on the Reynolds number for the average WF velocity in the screw channel at the outlet of the pump according to formula [11]; the Reynolds number was determined from dependence

$Re = \frac{4v_{ser.vux} R_g}{\nu_t}$; ν_t and ρ_c are WF kinematic viscosity and density, respectively accounting for the gas content, pressure and temperature, and calculated using dependences [12]; $\lambda(Re)$ is friction loss coefficient depending on Re for the average velocity of

the WF in the screw channel at the pump outlet; ζ_v , ζ_{vux} and ζ_{otv} are, respectively, local loss coefficients at the inlet and outlet, and at sudden change in the flow section determined by the formulas [13]; s_B is screw groove pitch; l_B is screw length; k_{ot} is a factor accounting for the number of sudden changes in the flow section along the length of the screw groove calculated as:

$$k_{ot} = \text{Int}(l_B/s_B), \quad (11)$$

where: $\text{Int}(l_B/s_B)$ is the integer part of the number; l_B/s_B is the nearest smaller number.

To ensure pump cavitation-free operation, the pressure at its inlet should be no less than the pressure of evaporation (for water, at 20 °C the pressure of saturated steam is 2.3388 kPa; at 30 °C, it is 4.2453 kPa) [14].

The method of calculating the pump discharge characteristic comprises the following sequence of actions [15, 16]:

First, one specifies the pump geometric parameters (the parameters of its working members), the parameters of the WF and the screw rotational speed.

The first stage of calculating with formula (4) was to determine the discharge defined by displacement of the volume of fluid in the screw groove of the pump per one screw revolution – $q_1(n)$.

The second stage was to specify the discharge defined by the flow of fluid found in the screw groove of the pump, which flows through the clearance formed by the sleeve thread tip and the screw groove space – $q_2(\Delta p_{vux})$. Note that the value of discharge $q_2(\Delta p_{vux})$ should not exceed the discharge $q_1(n)$. Formula (3) is used to find the average discharge at the pump outlet and formula (10) is used to find the average WF velocity in the screw channel at the pump outlet.

At the third stage, the Reynolds number is found using the average WF velocity in the screw channel at the pump outlet. Dependences (23) and (24) determine the coefficient of friction losses $\lambda(\text{Re})$, and formula (9) is used to find the pressure loss caused by local resistances and friction in a channel formed by the sleeve tip and screw groove space h_{vt} . The formula [11] is used to find the loss coefficient in the clearance formed by the sleeve thread tip and the screw groove space $\mu(\text{Re})$.

At the fourth stage, formula (8) is presented as:

$$p_{vux} - p_v = \Delta p_{vux} = \frac{q_2(\Delta p_{vux})^2 \rho_c}{2\mu(\text{Re})^2 \left[\frac{A_k}{2} + \delta R_g \right]^2} - \rho_c g(h_{vt} + l_B) \quad (12)$$

The pressure at the pump inlet was assumed to be $p_v = 0$. The values found at stages two and three were

substituted into formula (12), and the pressure at the pump outlet p_{vux} was found. Knowing q_a and p_{vux} yields the discharge characteristic point.

The fifth stage defines new discharge values $q_2(\Delta p_{vux})$, steps two to four are repeated and a new point of the discharge characteristic is found.

The calculation is repeated to obtain the required number of points for graph $H(q)$. Note that the maximum value of the pressure at the pump outlet is $q_1(n) = q_2(\Delta p_{vux})$.

The relative error between the calculated characteristics of the developed method and those obtained experimentally are given in [3, 10] and do not exceed 20 %. This discrepancy can be explained by the complexity of the vortices formation mechanism and fluid diffusion, and transfer of momentum at the screw-and-sleeve fluid interface. A unique advantage of the developed technique is that, as distinct from known methods, it does not contain empirical coefficients determined experimentally.

The power at the pump outlet is calculated as:

$$P = q_a \Delta p_{vux}. \quad (13)$$

LSP efficiency, according to the developed physical model, is calculated by the relationship:

$$\eta = \frac{q_a \Delta p_{vux}}{P_T} = \frac{30 q_a}{\pi^2 R_g^2 d_B n \text{ctg} \alpha}, \quad (14)$$

where: P_T is theoretical capacity; d_B is screw outer diameter; α is thread angle relative to the axis of the screw; n is screw rotational frequency, rev/min.

LSP IRREGULAR DELIVERY

The instantaneous discharge at the LSP outlet, depending on the angle of rotation of the screw, similar to formula (3), can be written as:

$$q_\Sigma(t) = z[q_1(\varphi(t)) - q_2(\Delta p_{vux})], \quad (15)$$

where: φ is screw angle of rotation.

We assumed that the screw thread tip varies according to a dependence describing the change of a short periodic triangular pulse [17], and the instantaneous discharge due to displacement of the volume of fluid in the screw groove of the pump was found by relationship:

$$q_1(\varphi(t)) = A_k L_k \varphi(t) - 4R_g (4R_g + b) h_B(\varphi(t)), \quad (16)$$

where: $h_B(\varphi)$ is sleeve thread tip change depending on the screw angle of rotation [17]:

$$h_a(\varphi) = \begin{cases} \frac{h_a}{k\pi}(\varphi + k\pi), & -k\pi \leq \varphi < 0, \\ \frac{h_a}{k\pi}(k\pi - \varphi), & 0 \leq \varphi < k\pi, \\ 0, & k\pi \leq \varphi < 2\pi - k\pi, \end{cases}$$

$$k = \frac{4R_g + b}{L_k}; \quad k \ll 1. \quad (17)$$

Note that the second term in equation (16) takes into account the discharge drop due to presence of the sleeve thread. Using $h_b(\varphi(t))$ found with (17) to compute the discharge, yields a slightly overrated result. However, this offsets to some extent the discharge drop due to WF compression in the screw groove.

Given dependence (16), the instantaneous discharge at the LSP outlet can be represented as:

$$q_\Sigma(\varphi(t)) = z A_k L_k \varphi(t) - 4 R_g (4 R_g + b) \sum_0^{z-1} h_{tB}(\varphi) [\varphi + k_z \beta] \varphi(t) - z \mu(\text{Re}) \times [2\pi R_g^2 + \delta R_g] \sqrt{2g \left(\frac{p_{vux} - p_v}{\rho_c g} + h_{vt} + l_B \right)}, \quad (18)$$

where: k_z is a factor that successively takes the values 0, 1, 2, ..., (z - 1); β is the angle between the centres of the grooves, $\beta = 2\pi/z$.

Note that formula (18) is valid under the condition:

$$z < \text{Int} \left(L_k / 4R_g + b \right), \quad (19)$$

where: $\text{Int} \left(L_k / 4R_g + b \right)$ is the integer part of the number; $\left(L_k / 4R_g + b \right)$ is the nearest smaller number.

Note that if condition (19) in the second term of equation (18) is not met, one should take into account the actual number of sleeve screw tips per one screw groove pitch. If condition (19) is not met when $z > \text{Int} \left(L_k / 4R_g + b \right)$, that is, when there are two or more sleeve screw tips at the pump outlet at the same time, this is taken into account by the coefficient of the second term in equation (18). Then it was assumed that condition (19) holds. Note that Δp_{vux} is never zero because the pump inlet is always under vacuum.

The LSP irregular delivery coefficient conditioned by compression of the WF in the grooves of the pump, when it is transferred from the suction cavity to the discharge one, can be accepted to be $\delta_{s.H} \approx 0$ with sufficient precision for calculations. The validity of this approach stems from the fact that, according to the physical model developed for the pump work process, during pump operation the screw grooves communicate at all times with the discharge cavity. This is used for calculating the instantaneous discharge resulting

transfer of the fluid volume found in the screw groove of the pump dependence (17), and yields a slightly overrated result. Hence, the overall irregular delivery coefficient for the LSP can be found from:

$$\delta_H \approx \delta_{t.H}. \quad (20)$$

The coefficient of irregularity was found from formulas (3), (15) and (18), implying that

$$\sum_0^{z-1} h_b(\varphi) [\varphi + k_z \beta] = z h_b(\varphi_0) \approx 2 z R_g, \quad \text{and } \varphi(t) = n.$$

Note that the error of such change does not exceed 0.01 %:

$$\delta_{t.H1} = \frac{2(4R_g + b)}{\pi L_k \bar{n} - (4R_g + b)}, \quad (21)$$

where: $\bar{n} = n/n_0$ is relative rotational frequency of the screw, $n_0 = 1 \text{ s}^{-1}$.

When $q_2(\Delta p_{vux}) = 0.5 q_1(\varphi(t))$, irregular LSP delivery is given by:

$$\delta_{t.H} = \frac{4(4R_g + b)}{\pi L_k \bar{n} - 2(4R_g + b)}. \quad (22)$$

When $q_2(\Delta p_{vux}) \approx 0$, the LSP irregular delivery coefficient is minimum.

If condition (19) is not met, that is, when there are two or more sleeve screw tips at the pump outlet at the same time, the irregular delivery coefficient increases. Note that when $q_1(\varphi(t)) = q_2(\Delta p_{vux})$, the discharge at the LSP outlet is $q_\Sigma(t) = 0$, and the irregular delivery coefficient has no sense.

Analysis of relationship (22) has shown that the irregular delivery coefficient of the LSP increases with hydraulic radius R_g and the width of the screw tips in cross section b , and is inversely proportional to the length of helical line L_k and screw rotational speed n . The resulting minimum value of the irregular delivery coefficient of the LSP, calculated with formula (21), is $\delta_{t.H1} = 3.897 \cdot 10^{-4}$, being an order of magnitude less than in screw pumps [18, 19]. This finding is consistent with the experimental and computational studies presented in [3, 10, 20, and 21].

ACCOUNTING FOR THE SHAPE OF THE SCREW GROOVE IN LSP CHARACTERISTICS

Presently, there is no general analytical dependence for finding the coefficient of hydraulic friction λ that would simultaneously take into account the fluid flow regime and the shape of the channel. Hydraulic friction coefficients for the laminar flow regime are calculated using the known formula [22]:

$$\lambda = \frac{A_f}{\text{Re}}, \quad (23)$$

where: A_f is shape factor for laminar WF motion (Table 1).

Table 1

Shape	Shape factor, flow regime	
	Laminar, A_f	Turbulent, K_f
Circle with the diameter d	64	0.11
Square with side a	57	0.098
Equilateral triangle with side a	53	0.091
Rectangle with an aspect ratio $a/b = 0.1$	85	0.15
$a/b = 0.2$	76	0.13
$a/b = 0.25$	73	0.12
$a/b = 0.33$	69	0.118
$a/b = 0.5$	62	0.10

Hydraulic friction coefficients for turbulent flow are determined with formula [23]:

$$\lambda = K_f \left(\frac{\Delta}{4R_g} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0.25}, \quad (24)$$

where: K_f is shape factor for WF turbulent motion (Table 1); Δ is average height of roughness protrusions.

To calculate hydraulic losses associated with LSP inlet and outlet flow, we used dependences well known in fluid and gas mechanics to calculate the leakage flows between the screw grooves for the forward and reverse flow of fluid and proposed to introduce, by

analogy with vortex diodes and jet resistor elements, the diodity factor:

$$D = \zeta_{obr} / \zeta_{pr}, \quad (25)$$

where: ζ_{pr} , ζ_{obr} is coefficient of drag between the screw grooves for liquid flow in the forward and reverse directions, respectively.

When considering the leakage flow of fluid between the edges that separate the screw grooves, friction losses were neglected because such flow was small. When considering the leakage flow towards the pump discharge as narrowing and expanding at angle α , which, in the first approximation, can be taken as sudden, the resistance to direct fluid flow is determined by the relationship:

$$\zeta_{pr} = \zeta_{1zv} + \zeta_{1ros}, \quad (26)$$

where: ζ_{1zv} and ζ_{1ros} are, respectively, the drag coefficient of the liquid narrowing and expanding at angle α determined by the diagrams in [13].

The drag coefficient for the reverse flow of fluid is given by:

$$\zeta_{obr} = \zeta_{2zv} + \zeta_{2ros}, \quad (27)$$

where: ζ_{2zv} and ζ_{2ros} are drag coefficients, respectively, for fluid narrowing and expanding at angle α , [13].

To account for diodity in the LSP discharge characteristic, the coefficient accounting for the number of sudden changes in flow area along the length of screw grooves k_{ot} , which is calculated with formula (11), should be divided by diodity factor D . Analysis of the shape of LSP screw grooves performed in [23 – 25] allowed improving the shape of pump working members [26, 27].

CRITERIA FOR COMPARISON OF LSP CHARACTERISTICS

When calculating LSP performance, it is necessary to compare the characteristics of LSPs with working members having different shapes. Using the hydraulic radius of screw groove R_g allows for a partial analysis. However, analysing with R_g is challenging. Partly, this problem can be addressed by taking into account the hydraulic resistance coefficient for friction λ , which takes into account the shape of screw grooves. However, its use fails to account for all the geometrical parameters of LSP working members. Note that commercial LSPs tend to have a semi-circular shape of screw grooves, so the most important consideration is this shape.

For a comparative evaluation of performance of LSPs with working members of different shapes, we proposed to use relative diameter $\tilde{d} = d_b/R_g$, where d_b is diameter of the screw, and the specific LSP parameters we have introduced [28]. Specific head is the head that accounts for a unit of relative length per one unit screw thread lead, and is calculated as:

$$\tilde{H} = \frac{H}{z l_b/R_g}. \quad (28)$$

Similar to the specific head, we introduced specific discharge \tilde{q} ; specific capacity \tilde{P} ; and specific efficiency $\tilde{\eta}$ calculated with the following dependences:

$$\tilde{q} = \frac{q}{z l_b/R_g}; \quad \tilde{P} = \frac{P}{z l_b/R_g}; \quad \tilde{\eta} = \frac{\eta}{z l_b/R_g}. \quad (29)$$

The proposed dimensionless criteria allow analysing the influence of the geometric shape of screw grooves on LSP performance, optimising them and obtaining a line of LSPs with high efficiencies.

CONCLUSIONS

Review of the literature has shown that no modern theory of LSP design exists. Currently available theories are based on using empirical relationships, and the physical model of the work process fails to fully account for the loss of friction in the LSP and the leakage flow between the grooves.

We have rectified the physical model of the LSP work process with regard to pressure loss at the pump inlet and outlet and the leakage flow across the radial clearance between the sleeve and the screw grooves.

We first developed an integrated methodology for calculating the LSP discharge characteristic. In contrast to known ones, it has no empirical coefficients found experimentally. It takes into account as a whole the geometric and operating parameters of the pump, the nonstationary nature of WF flow and its parameters. An analytical dependence for calculating the instantaneous delivery and LSP irregular delivery coefficient was obtained.

To evaluate the influence of the shape of working members on LSP performance, we suggested using the hydraulic radius of the screw groove, the relative diameter, specific head, specific discharge, specific capacity, efficiency and the diodity coefficient.

The theory developed at the LSP design phase will allow analysing the influence of the geometric shape of screw grooves on LSP performance, optimise them, and obtain a line of high-efficiency LSPs.

REFERENCES

1. Martsinkovskiy V.A., 1980: Beskontaknyie uplotneniya rotornyih mashin. – M.: Mashinostroenie, 200.
2. Myaskovskiy E.G., 1965: Issledovanie labirintno-vintovogo uplotneniya dlya vraschayuschihsva valov tsentrobezhnyih himicheskikh nasosov. Avtoref. dis. na soisk. uchen. stepeni kand. tehn. nauk. – M.: Mashinostroenie, 18.
3. Golubev A.I., 1981: Labirintno-vintovyye nasosyi i uplotneniya dlya agressivnyih sred. – 2 izd. – M.: Mashinostroenie, 112.
4. E. Bilgen, A. Akgungor, 1973: The turbulent double screw pump-theory and experiment. // 6th International Conference on Fluid Sealing, BHRA, Cranfield, Bedford, England, 45-60.
5. Grabow G., 1964: Untersuchungen an einer Labyrinthpumpe. // Maschienenbautechnik, 12-15.
6. Sapozhnikov S.V., 2002: Vrahuvannya gazovoyi skladovoyi seredovischa, scho perekachuetsya, pri viznachenni konstruktsiyi ta robochoyi charakteristiki dinamichnogo nasosa: dis. ... kand. tehn. / S.V. Sapozhnikov. – Sumi, 206.
7. Golubev A.I., 1961: Labirintnyie nasosyi dlya himicheskoy promyishlennosti. – M.: Mashinostroenie, 76.
8. V. Arsiriy, Y. Serbova, V. Makarov, 2010: Koeffitsient poleznogo deystviya gidravlicheskih sistem // MOTROL, № 12C, 90-96.
9. Bashta T.M., 1968: Ob'emnyie gidravlicheskie privodyi / Bashta T.M., Zaychenko I.Z., Ermakov V.V. i dr. Pod red. T.M. Bashtyi. – M.: Mashinostroenie, 628.
10. Andrenko P.M., Lebedev A.Y., Bilokin I.I., i in., 2013: Eksperimentalni doslidzhennya labirintno-gvintovogo nasosa // Promislova gidravlika i pnevmatika. – № 2(40), 21-30.
11. Danilov Y.A., Kirillovskiy, Y.L., Kolpakov Y.G., 1990: Apparatura ob'emnyih gidroprivodov: Rabochie protsessyi i charakteristiki. – M.: Mashinostroenie, 272.
12. Z. Lur'e, I. Fedorenko, 2010: Issledovanie rabocheho protsessa mehatronnogo gidroagregata sistemyi smazki metalurgicheskogo oborudovaniya s uchetom karakteristik dvuhfaznoy zhidkosti // MOTROL, № 12C, 10-25.
13. Idelchik I.E., 1992: Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam – M.: Mashinostroenie, 672.
14. Lebedev A.Y., 2013: Viznachennya kriteriya kavitatsiyi labirintno-gvintovogo nasosa. // Visnik NTU "HPI". Seriya "Matematichne modelyuvannya v tehnitsi ta tehnologiyah". – № 5, 124-129.
15. Lebedev A.Y., 2011: Algoritm rascheta rashodnoy charakteristiki labirintno-vintovogo nasosa // Sbornik dokladov 15-y Mezhd. nauch.-tehn. konf. studentov i aspirantov "Gidromashinyi, gidroprivodyi i gidropnevmoavtomatika". – M.:, 66-69.
16. Lebedev A.Y., Andrenko P.M., 2011: Integralna metodika rozrahunku vitratnoyi charakteristiki

labirintno-gvintovogo nasosa // Visnik SumDU. Seriya "Tehnichni nauki". – № 4, 20-25.

17. Politehnicheskii slovar, 1989: / redkol.: A.Y. Ishlinskiy (gl. red.) i dr.. – 3-e izd., pererab. i dop. – M.: Sovetskaya entsiklopediya, 656.

18. Lebedev A.Y., Andrenko P.M., 2012: Vznachennya nerivnomirnosti podachi labirintno-gvintovogo nasosa // Promislova gidravlika i pnevmatika. – № 3 (37), 33-37.

19. Lebedev A.Y., Andrenko P.M., 2012: Metodika vznachennya nerivnomirnosti podachi labirintno-gvintovogo nasosa // XVII mizhnar. nauk.-tehn. konf. "Gidroaeromehanika v inzhenerniy praktitsi", 17 – 20 kvIt., 80.

20. Lebedev A.Y., Maltsev Y.I., 2013: Matematichne modelyuvannya techiyi robochoyi ridini v labirintno-gvintovomu nasosi // Pratsi TDATU. – Melitopol. – Vip.13. – T.6., 196-202.

21. P. Andrenko, A. Lebedev. 2011: Matematicheskaya model stenda dlya ispytaniya nasosa // MOTROL, № 13C, 200-210.

22. Emtsev B. T., 1987: Tehnicheskaya gidromehanika. – M.: Mashinostroenie, 440.

23. Lebedev A.Y., 2011: Vznachennya koefitsienta vtrata na tertya dlya rozrahunku karakteristiki labirintno-gvintovogo nasosa // Pratsi TDATU. – Melitopol. – Vip.12. – T.3., 215-219.

24. Lebedev A.Y., 2012: Vpliv geometrichnih parametriv labirintno-gvintovogo nasosa na yogo karakteristiki // "Suchasni tehnologiyi v promislovomu virobnitstvi", mater. II vseukr. mizhvuz. nauk.-tehn. konf. – Sumi, 62-63.

25. Lebedev A.Y., 2012: Vpliv formi kanalu labirintno-gvintovogo nasosa na yogo karakteristiki // Informatsiyni tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya : XX Mizhnar. nauk.-prak. konf., – 15 – 17 trav. Ch.1 – Harkiv, 122.

26. Patent na korisnu model 68863 Ukrayina, MPK F04D 3/00. Labirintno-gvintoviy nasos / Andrenko P.M., Stetsenko Y.M., Bilokin I.I., Lebedev

A.Y., Makogon V.A.; zayavnik i patentovlasnik Andrenko P.M., Stetsenko Y.M., Bilokin I.I., Lebedev A.Y., Makogon V.A. – № u 2011 12505; zayavl. 25.10.2011; opubl. 10.04.2012, Byul. № 7.

27. Patent na korisnu model 73119 Ukrayina, MPK F04D 3/00. Labirintno-gvintoviy nasos / Andrenko P.M., Stetsenko Y.M., Bilokin I.I., Lebedev A.Y., Makogon V.A.; zayavnik i patentovlasnik Andrenko P.M., Stetsenko Y.M., Bilokin I.I., Lebedev A.Y., Makogon V.A. – № u 2012 02788; zayavl. 12.03.2012; opubl. 10.09.2012, Byul. № 17.

28. Andrenko P.N., Lebedev A.Y., 2013: Kriterii dlya sravneniya karakteristik labirintno-vintoviyh nasosov // XVIII Mizhnar. nauk.-teh. konf. "Gidroaeromehanika v inzhenerniy praktitsi". K.: 21-24 trav., 135.

ТЕОРИЯ ЛАБИРИНТНО-ВИНТОВЫХ НАСОСОВ

Аннотация: Приведен анализ существующих методик расчета лабиринтно-винтовых насосов. Уточнена физическая модель его рабочего процесса. Разработана интегральная методика расчета расходной характеристики насоса, которая в отличие от известных, не содержит эмпирических коэффициентов и учитывает форму винтовой канавки. Приведены новые аналитические зависимости для расчета мгновенной подачи насоса и коэффициента ее неравномерности. Предложены безразмерные критерии для сравнения характеристик насоса с разной формой винтовой канавки.

Ключевые слова: лабиринтно-винтовой насос, характеристики, подача, неравномерность подачи, форма винтовой канавки, критерии сравнения.

АНАЛИЗ НОРМ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ В УКРАИНЕ

Виктор Маслак^a, Надежда Насонкина^b, Марина Гутарова^b,
Константин Яковенко^b, Андрей Чумак^c

a – Международная ассоциация «Укрводоканалэкология»

Адрес: Украина, г. Киев

E-mail: maslak9@rambler.ru

b - Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

Адрес: 86123, Украина, Донецкая обл., г. Макеевка, ул. Державина, 2,

E-mail: Nasonkina70@mail.ru

c - ООО «Аквацентр»

Адрес: Украина, г. Киев, пер.Задорожный, 6

E-mail: an_chumak@ukr.net

Аннотация. Проведен анализ норм водопотребления в Украине для различных категорий потребителей. Рассмотрены вопросы изменения норм водопотребления в зависимости от комфортности жилья и других факторов. Проанализированы факторы, влияющие на точность водосчетчиков.

Ключевые слова: водоснабжение, норма водопотребления, водосчетчик, показания, расход, потери

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Обеспечение населения Украины доброкачественной питьевой водой – это одно из приоритетных направлений социально-экономической политики государства.

Определение требуемых количеств воды является важной задачей при проектировании систем водоснабжения. Изменение режимов водопотребления городов, строительство высотных зданий и жилья повышенной комфортности, требует сегодня пересмотра норм водопотребления и реконструкции систем водоснабжения зданий.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Работы по изучению систем водоснабжения зданий выполнялись под руководством таких ученых, как И.Г. Староверов, И.В. Кожин, С.С. Душкин, В.О. Слипенко и других [1,2,5,11,14,15,17-19]. Однако, сегодня еще не полностью решена задача питьевого водоснабжения для жилья повышенной комфортности, высотных зданий и норм водопотребления в условиях почасовых графиков. Специалисты сегодня, как никогда остро нуждаются в нормативных документах и практической литературе для инженерных систем зданий с нестандартными условиями эксплуатации.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью исследований является анализ норм водопотребления в Украине, установление фактических норм водопотребления для жилья различного уровня комфортности.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Обхват муниципальным водоснабжением в Украине достаточно высокий. Процент потребителей, получающих воду из городского водопровода, варьируется от 26 для сельской местности до 83 в городе.

В последние десятилетия наблюдается тенденция снижения спроса на воду предприятиями коммунального хозяйства (в среднем с 1990 года в 1,7 раза). В некоторых местах он сократился вдвое, из-за снижения промышленного водопотребления, отмены снабжения горячей водой и учета водопотребления с помощью счетчиков.

Однако, водопотребление населения остается на относительно высоком уровне. Уменьшить его можно за счет установки приборов учета. В последние годы процент потребителей с приборами учета увеличился до 86% (рис. 1).

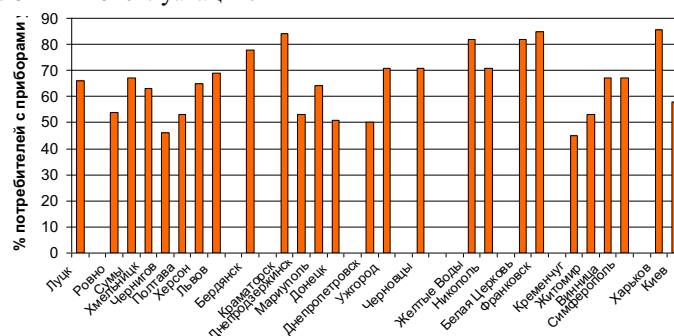


Рис.1. Охват приборами учета населения Украины (на 01.01.2014г.)
Fig.1. Coverage by water meters у population of Ukraine (on 01.01.2014)

Сегодня население является основным потребителем питьевой воды в любом населенном пункте, поэтому важно иметь точные сведения о количестве потребляемой жителями воды.

Расходование воды каждым пользователем обусловлено как степенью благоустройства жилья, так и индивидуальными особенностями человека, традициями и культурой водопользования.

По данным систематических наблюдений, средняя величина удельного суточного потребления воды в жилых зданиях в 1971, 1977 и 1996 гг. составляла соответственно 200, 240 и 306 л/сутки-чел. [18], тогда как в других странах нормой считается 150-200 л/сутки-чел (рис. 2) [3,15,19].

Ряд городов в разных странах мира чувствует сегодня дефицит питьевой воды. Потому необходимо учитывать минимальную норму водопотребления, которая складывается из [6,9]: санитарно-гигиенических; проектных; коммерческих и эксплуатационных норм.

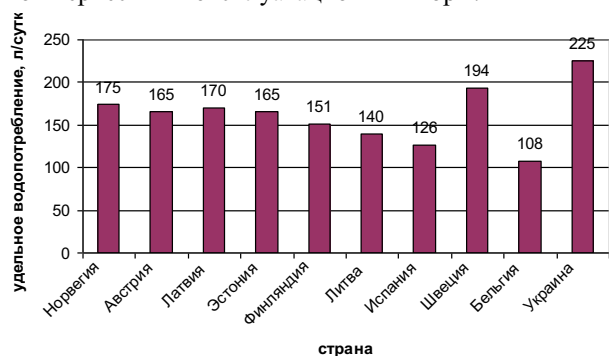


Рис. 2. Сравнение показателей удельного потребления

Fig. 2. Comparison of indicators of specific consumption

Оценочный способ расчета удельного водопотребления в методическом смысле несовершенен, в результате чего расчетные значения значительно отличаются от фактических величин [19].

Основными причинами искажения являются недоучет демографической ситуации и структурные особенности потребления разными категориями водопотребителей.

Анализ величин удельного водопотребления показывает, что даже при достаточно приблизительных методах расчета диапазон их колебаний весьма большой. Это является непрямым свидетельством некоторой неопределенности критериев удельного водопотребления. По состоянию на 31.12.2011 г. реальные нормы водопотребления в отдельных регионах Украины представлены на рисунке 3, планируемые на 2014г. – на рисунке 4.

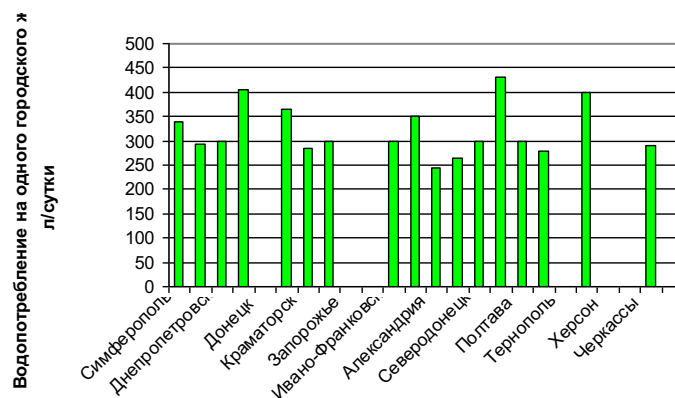


Рис. 3. Существующие суточные нормы водопотребления по Украине (данные 2012г.)

Fig. 3. Daily water consumption rates in Ukraine (2012)

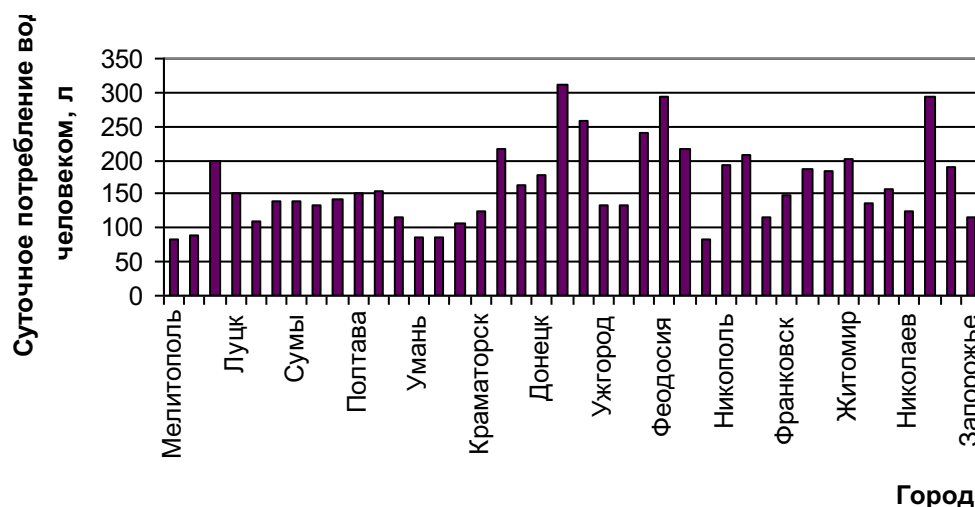


Рис. 4. Планируемые нормы водопотребления по Украине на 2014г. (для предприятий, занимающихся добычей и реализацией воды)

Fig. 4. The planned water consumption rates in Ukraine in 2014 (for enterprises engaged in production and marketing of water)

В среднем по Украине минимальный уровень водопотребления составляет 180 л в сутки на одного жителя.

Основные положения концепции мотивации норм водопотребления и водосбережения в жилищном фонде можно представить по А. Маслоу в виде пяти уровней потребностей населения в воде: физиологичный минимум, гигиенические и социальные потребности, потребность в признании и самоутверждении. После удовлетворения перечисленных выше потребностей и при наличии соответствующих возможностей у человека появляется потребность в особенном благоустройстве жилья, оборудовании его самыми современными санитарно-техническими устройствами.

Уточнение структуры водопотребления позволяет обнаружить резерв – теоретическую величину, определяемую как разницу между фактическим и идеальным водопотреблением, что является потребностью человека в воде при оптимальном действии на организм физиологичных факторов (температуры воздуха, инсоляции, физической нагрузки и т.д.). Для полной реализации резерва необходимо создание идеальных условий в системе, что требует значительных материальных расходов, и на существующем техническом уровне невозможно. Но это не снижает важности его определения, поскольку резерв позволяет обнаружить возможности экономии воды при

действии на разные элементы системы и определить стратегию борьбы с потерями.

Для определения резерва хозяйственно-питьевого водоснабжения необходимо знать идеальное водопотребление, которое определяется потребностью человека в воде для проведения санитарно-гигиенических процедур и хозяйственных процессов.

Хозяйственно-гигиеническая потребность в воде определяется на основе анализа и обработки данных по медико-гигиеническим исследованиям и в среднем составляет 75,6 л/сутки·чел. В социальной потребности дополнительно учитывается влияние климата (табл. 1.) и ее значение достигает - 111,3 л/сутки·чел.

В результате водопользования возникают потери. При этом фактическое потребление воды значительно превышает реальную потребность, доходя до 300-500л/сутки·чел. Для вышеупомянутой социальной потребности резерв водопотребления составляет 200-400 л/сутки·чел, в зависимости от величины потерь, определяемых техническим состоянием системы.

В таблице 2 приведены средние показатели потребления воды в быту.

Из приведенных данных можно сделать вывод о превышении в Украине научно - обоснованных норм потребления воды.

В настоящее время оценка работы систем водоснабжения проводится по фактическому водопотреблению без уточнения его структуры.

Таблица 1. Структура водопотребления в хозяйственно-питьевом водоснабжении
Table 1. The structure of water consumption in drinking water supply

Процедура	Потребность в воде, л/ сутки.чел.	
	хозяйственно-гигиеническая	социальная
Питьевые потребности	1,5	2
Приготовление еды	3,4	4,6
Мойка посуды	8,7	10,7
Умывание, чистка зубов	7	11
Душ, ванна	15,7	26,6
Стирка	13,6	19,2
Смывной бачок	20,7	31,4
Уборка	5	5,8
Всего	75,6	111,3

Таблица 2. Расходы воды потребителями в быту, л/ сутки·чел
Table 2. Water consumption by consumers at home, l /per· person

Виды потребления воды	Болгария	Россия	США	Узбекистан	Украина
Приготовления еды и питьевые нужды	5	6	12	10	9
Ежедневный туалет (чистка зубов, умывание)	10	30	-	28	26
Ванна	-	29	74	43	49
Душ	50	23	-	5	27
Стирка	10	49	8	50	42
Смыв унитаза	40	40	82	32	35
Всего	115	177	176	168	188

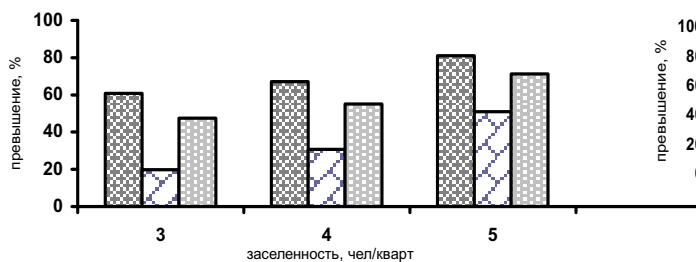


Рис. 5. Превышение данных СНиП над фактическими расходами воды (в часы максимального водопотребления): А - по холодной воде; Б - по горячей воде; В - по общему потреблению воды.

Fig. 5. The excess of data of Construction Norms and Rules above actual water flow rate (hours maximum water consumption): A - cold water, B - hot water, B - total water consumption

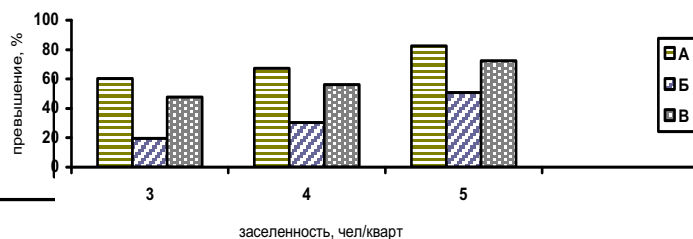


Рис. 6. Превышение данных СНиП над фактическими среднесуточными расходами воды:

А – по холодной воде; Б – по горячей воде; В – по общему водопотреблению.

Fig. 6. The excess of data of Construction Norms and Rules above actual average daily water flow rate: A - cold water, B - hot water, B - total water consumption.

Наглядным примером превышения нормативов СНиП над фактическими расходами могут служить диаграммы, полученные в ходе исследования водопотребления многоэтажных зданий (свыше 12 этажей современного благоустройства с централизованным горячим водоснабжением) после проведения в них комплекса водосберегающих мероприятий (рис.5-6) [15].

С целью определения фактических норм водопотребления проводилось также обследование систем водоснабжения упорядоченного жилья Донецкой и Луганской областей.

В ходе обследований были выбраны здания с разной степенью благоустройства. Рассматривались, как частные домовладения, так и двух-, пяти-, девятиэтажные здания с общедомовыми водомерами.

В первом блоке исследований были выбраны города с почасовыми графиками подачи воды (с 6.00 до 10.00 и с 18.00 до 22.00 часов).

Результаты исследований показали зависимость водопотребления на одного человека от состава семьи (табл.3, рис. 7,8).

Аналогичные исследования были проведены для городов с круглосуточной подачей воды.

Обработка данных показала превышение существующих нормативов над реальным водопотреблением при наличии домашних водомеров и при отсутствии счетчиков - повышения водопотребления над действующими нормами.

Сравнительный анализ действующих норм водопотребления с реальным водопотреблением в частном домовладении приведен на рис.9.

Следует отметить, что независимо от климатических условий, благоустройства здания, режима подачи воды, действующие нормативы превышают фактическое расходование воды потребителем.

Таблица 3. Изменение водопотребления на одного человека в зависимости от состава семьи

Table 3. Change in water consumption per one person depending on the composition of the family

Численность семьи, чел	Средняя затрата на одного человека в л/сутки, при действующей норме на одного человека л/сутки		
	305	150	120
1	320,99	95,39	125,00
2	138,16	198,74	107,00
3	149,99	93,20	87,72
4	152,96	-	112,56
5	-	67,43	-

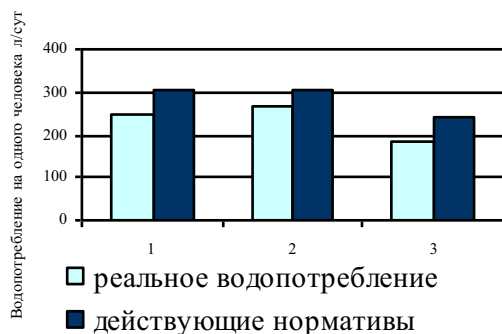


Рис. 7. Превышение действующих нормативов над реальным водопотреблением для многоквартирных зданий:

1. оборудованных ваннами с горячим водоснабжением (305 л/сутки·чел.); 2 - с водопроводом с ванной, электро-, газовыми плитами, газовыми колонками (305 л/сутки·чел.); 3 - с водопроводом с ванной, с печным отоплением (240 л/сутки·чел.)

Fig. 7. The excess of current regulations over actual water consumption for multi apartment buildings:

1. equipped with baths with hot water supply (305 liters / per-person) 2 - with plumbing bath, with electrical or gas stoves, with gas water heater (305 l / per-person) 3 - with plumbing bathroom, with stove heating (240 l /per-person.)

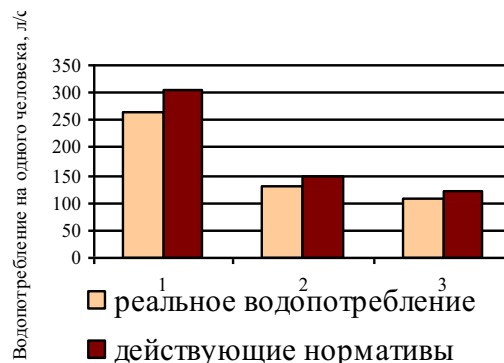


Рис. 8. Превышение действующих нормативов над реальным водопотреблением для частного домовладения:

1. с водопроводом в доме с ванной и электро-, газовыми плитами (305 л/сутки·чел.); 2 - с водопроводом в доме без ванн, с печным отоплением (150 л/сутки·чел.); 3- с использованием питьевой воды из дворовых водоразборных кранов (120 л/сутки·чел.)

Fig. 8. The excess of current regulations over actual water consumption for private home ownership:

1. with plumbing in a house with bath and electrical or gas stoves (305 liters / per-person) 2 - with plumbing in a house without bath, with stove heating (150 l / per-person) 3 – with using drinking water of the yard hydrant (120 l / per-person)

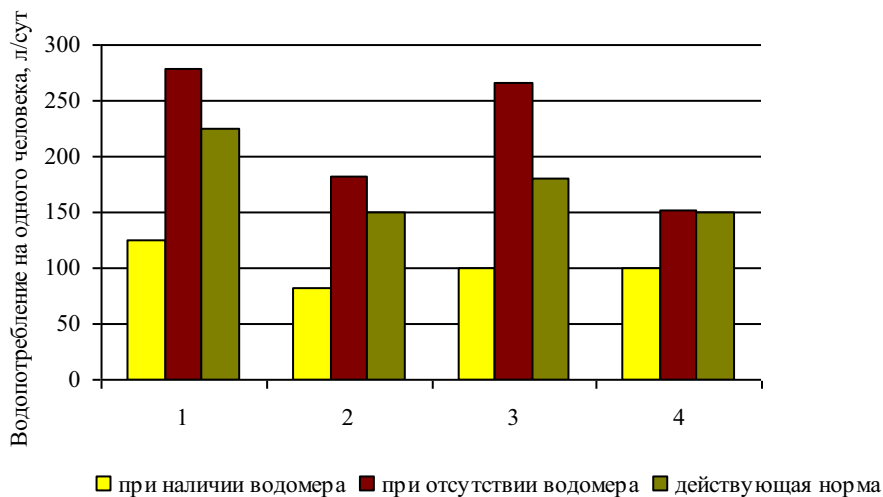


Рис. 9. Сравнительный анализ действующих нормативов с существующим водопотреблением в частном домовладении: 1 - с водопроводом, канализацией или выгребной ямой, оборудованные газовыми плитами или электроплитами (225 л/сутки·чел.); 2 - с водопроводом, без канализации, без ванн (150 л/сутки·чел.); 3 - с водопроводом, канализацией, выгребными ямами, кухонным очагом без газообеспечения / то же при наличии титана на твердом топливе (180÷230л/сутки·чел.); 4 - с подачей питьевой воды из дворовых колонок (150 л/сутки·чел.);

Fig. 9. Comparative analysis of current regulations with the existing water consumption in a private home ownership: 1 - with water supply, with sewerage or cesspool, equipped with gas stoves or electric stoves (225 l / per-person) 2 - with water supply, without sewerage, without bath (150 l / per-person) 3 - with water supply, with sewerage or cesspool, with kitchen without gas supply / same in the presence of water heater on solid fuels (180 ÷ 230 l / per-person) 4 - with supply of drinking water from the hydrants (150 l / per-person);

Сравнение действующих нормативов с реальным водопотреблением одной семьей дает аналогичные результаты: наблюдается снижение общего водопотребления семьей при увеличении состава проживающих, а также превышение действующих нормативов.

Из полученных результатов видно значительное превышение водопотребления у населения там, где дома не оборудованы счетчиками воды, в среднем на 20 - 86 л/сутки·чел., а при наличии водоизмерительной арматуры - снижение затрат воды почти в два раза (от 50 до 100 л/сутки·чел.).

Сравнение водопотребления жителей частного сектора (одного типа благоустройства) при наличии, или отсутствия водомеров, приводит к перерасходу воды с 52,2 до 166,52 л/сутки·чел, что свидетельствует о нерациональном расходовании воды.

Реальное водопотребление в частном секторе, оснащенный водомерами, колеблется в пределах 81,39-125,4 л/сутки·чел, а при отсутствии счетчиков водопотребление увеличивается до 152,2-278,2л/сутки·чел.

Расходы воды потребителями, принятые по общедомовому водомеру, превышают нормируемые величины. Это можно объяснить в первую очередь

благоустройством зданий и состоянием инженерных коммуникаций, а так же погрешностями счетчиков.

С целью выявления разногласия были проведенные исследования в домах с общедомовым и квартирными счетчиками.

Результаты исследований приведены в таблице 4.

Полученные данные свидетельствуют о необходимости приведения счетчиков к одному классу точности.

Каждый водомер, независимо от его типа имеет ограничения при измерении расхода и определенную величину потерь воды. К основным факторам, влияющим на точность приборов можно отнести: режим подачи воды, метрологический класс водомера и монтажное положение счетчика.

В ходе исследований были выбраны 4 квартирных счетчика разных классов точности с номинальным расходом 1,5м³/час. Результаты исследований (таблицы 5-8) подтверждают, что не каждый водомер имеет одинаковый порог чувствительности в зависимости от перечисленных выше факторов.

С целью уменьшения величины потерь воды и гарантии точности учета необходимо выбирать водомер самого высокого класса точности и определять для него оптимальное монтажное положение.

Таблица 4. Расходы воды, которые связаны с классом точности водомеров
Table 4. Water consumption, which are associated with an accuracy class of water meters

Название района	Водопотребление на 1 жителя, м ³ /месяц			Потери воды, которые связаны с классом точности счетчиков	% потерь, которые связаны с классом точности счетчиков
	по показаниям квартирных счетчиков	по показаниям общедомовых счетчиков	разница		
Авдеевка	2,2	8,7	6,5	125,4	28,5
Амвросиевка	2,6	8,5	5,9	32,4	26,8
Артемовск	1,9	7,9	6,1	336,3	38,3
Волноваха	2,1	7,4	5,4	56,1	18,8
Енакоево	3,0	7,8	4,8	223,5	10,6
Кировское	1,8	6,6	4,7	77,0	16,3

Таблица 5. Влияние на точность измерения класса водомера и монтажного положения (горизонтальное)
Table 5. Effect on the accuracy of measurement of the water meter class and the mounting position (horizontal)

Тип водомера	Класс точности	Водопотребление при горизонтальном положении, л/ч				
		начальное показание счетчика, м ³	конечное показание счетчика, м ³	расход, м ³	Отклонение в сравнении с водосчетчиком типа 820 Sensus	
					абсолютное, м ³	относительное, %
820 Sensus	C	1,444	60,094	58,650	0,000	-
JS 1,5 NK Apator	B plus	1,150	59,910	58,760	0,110	0,19
KB-1,5i	B	2,269	58,129	55,860	-2,790	-4,76
Residia Jet Sensus	B	61,858	116,068	54,210	-4,440	-7,57

Таблица 6. Влияние на точность измерения класса водомера и монтажного положения (вертикальное)
Table 6. Effect on the accuracy of measurement of the water meter class and the mounting position (vertical)

Тип водомера	Класс точности	Водопотребление при горизонтальном положении, л/ч				
		начальное показание счетчика, м ³	конечное показание счетчика, м ³	расход, м ³	Отклонение в сравнении с водосчетчиком типа 820 Sensus	
					абсолютное, м ³	относительное, %
820 Sensus	C	62,334	118,984	56,650	0,000	-
JS 1,5 NK Apator	A plus	62,080	114,480	52,400	-4,250	-7,50
KB-1,5i	A	60,169	111,049	50,880	-5,770	-10,19
Residia Jet Sensus	A	118,058	166,628	48,570	-8,080	-14,26

Таблица 7. Влияние на точность измерения класса водомера, режима подачи воды и монтажного положения (горизонтальное)

Table 7. Effect on the accuracy of measurement of the water meter class, the regime of water supply and mounting position (horizontal)

Тип водомера	Класс точности	Водопотребление при горизонтальном положении, л/ч		
		расход воды в ночное время (с 1 час до 5 часов)	Отклонение в сравнении с водосчетчиком типа 820 Sensus	
			абсолютное, м ³	относительное, %
820 Sensus	C	2,230	0,000	-
JS 1,5 NK Apator	B plus	2,070	-0,160	-7,17
KB-1,5i	B	1,590	-0,640	-28,70
Residia Jet Sensus	B	1,230	-1,000	-44,84

Таблица 8. Влияние на точность измерения класса водомера, режима подачи воды и монтажного положения (вертикальное)

Table 8. Effect on the accuracy of measurement of the water meter class, the regime of water supply and mounting position (vertical)

Тип водомера	Класс точности	Водопотребление при горизонтальном положении, л/ч		
		расход воды в ночное время (с 1 час до 5 часов)	Отклонение в сравнении с водосчетчиком типа 820 Sensus	
			абсолютное, м ³	относительное, %
820 Sensus	C	2,150	0,000	-
JS 1,5 NK Apator	A plus	1,090	-1,060	-49,30
KB-1,5i	A	1,000	-1,150	-53,49
Residia Jet Sensus	A	0,860	-1,290	-60,00

При определении нормы водопотребления необходимо обращать внимание на потери воды в домах.

Следствием потерь воды в жилых домах является избыточная величина удельного водопотребления населения, которое в 1,5-3 раза больше, чем в странах Западной Европы. Установлено по [3-8,13,16,20], что непродуктивные потери воды увеличивают общий разбор воды на 20-30%, утечки воды в жилых домах — на 30-60%, а утечки воды из водопроводных сетей - на 15 - 30%.

Каждая из этих величин по-разному влияет на формирование общего разбора воды из водопроводных сетей для каждого из расчетных случаев.

Потери и утечки воды являются наибольшими при минимальном водопотреблении, наименьшими - при максимальном, а непродуктивные потери – наоборот.

Особенно остро проблема потерь воды стоит для зданий повышенной этажности. Начиная с 1992 года в Украине, начался бурный рост жилых

высотных домов и зданий с повышенным уровнем комфортности.

Повышение гидравлической надежности систем питьевого водоснабжения таких домов обеспечивается зонированием их по высоте. Для обеспечения надежности водоснабжения отдельных многоэтажных зданий, расположенных в районах с меньшей поверхностью застройки, должны устанавливаться локальные насосные станции [10,12].

Однако, вопросы водоснабжения высотных зданий и домов с повышенным уровнем комфортности практически лишены нормативной базы. Например, расчетные расходы, которые определяются по [18] допускают вычисление коэффициента, в зависимости от вероятности действия санитарно-технических приборов, что не совсем корректно для жилья повышенной комфортабельности, где расход зависит от количества жителей и особенностей самой системы.

Практика эксплуатации дополнительного оборудования показывает, что основной причиной неудовлетворительной работы систем водоснабжения зданий повышенной комфортности, является отсутствие проекта на весь комплекс работ [12].

В качестве примера рассмотрим систему водоснабжения 24 квартирного здания повышенной комфортности. Общее водопотребление – 9 м³/сутки (рис. 10).

Существующая система водоснабжения жилого дома характеризуется низкой надежностью. На протяжении суток наблюдается снижение давления в системе до 1,5 атм. (при норме 4,2 атм), ухудшение качества воды по ряду органолептических показателей (мутность, концентрация железа и др.). Такое положение системы вызывает постоянные жалобы жителей.

С целью оптимизации работы системы водоснабжения жилого дома, предложено установить локальную станцию.

Для обеспечения бесперебойной подачи воды потребителям на выходе из очистительной установки устанавливается автоматизированная насосная станция. На насосной станции предлагается установить два насоса разной производительности и два гидроаккумулятора.

При максимальном давлении на оси насоса (во время простоя) 4,8 атм на верхнем этаже давление будет составлять $4,8 - 2,7 = 2,1$ атм. Давление воздуха в пустых гидроаккумуляторах должно быть не более 90% от значения минимального свободного давления, т.е. – $0,8 \times 0,9 = 0,72$ атм. Объем воды, выходящей из гидроаккумуляторов при падении давления, «полный играющий объем» составляет 80 л. Следует отметить, что «полный играющий объем» гидроаккумуляторов, установленных внизу (возле насосов) - 40 л. Объем воды, выходящей из гидроаккумуляторов при падении давления после включения насоса второй ступени - 51 л (24 л – при нижнем размещении гидроаккумуляторов).

Режим работы станции приведен в таблицах 9, 10.

Сравнение полученных данных показывает, что насос первой степени обеспечивает полностью потребителя водой 23 часа в сутки; продолжительность работы второго насоса - 1 час; сокращение энергопотребления при работе по двухступенчатой схеме - $(9,72 - 5,15) \times 30 = 137,1$ кВт в месяц, или 47%. Кроме того, размещение гидроаккумуляторов на верхнем этаже позволяет увеличить «рабочий» объем в 5,5 раза и снизить гидравлические потери на 0,6-0,9 атм.

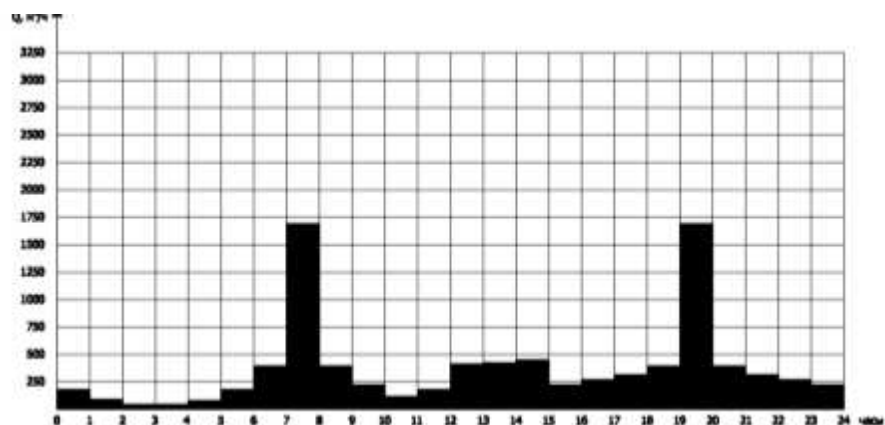


Рис. 10. График среднесуточного водопотребления
Fig. 10. The graph of the daily average water consumption

Таблица 9. Параметры работы насосной станции (при работе насоса №2)
Table 9. Parameters operation of the pumping station (when the pump number 2 is operating)

Режим водоразбора	Расход, м ³ /час		Продолжительность режима, час		Расходуемая мощность, кВт	
	средний	максимальный	средний	максимальный	средний	максимальный
минимальный	0,54	1,08	8,0	4,5	7,0	5,0
средний	1,62	2,16	1,3	0,9	1,6	1,2
интенсивный	3,24	4,32	0,6	0,8	0,9	1,23
пиковый	6,48	8,64	0,1	0,2	0,22	0,44
Всего	-	-	10	6,4	9,72	7,87

Таблица 10. Параметры работы повысительной насосной станции
Table 10. Parameters operation of the step-up pumping station

Режим водоразбора	Наиболее достоверное кол-во открытых приборов		Расход, м ³ /час		Продолжительность режима, час		Реализованный объем воды, м ³	
	средн	макс	средн	макс	средн	макс	средн	макс
обычный	0	0	0		14,0	17,6	0	0
минимальный	1	2	0,54	1,08	8,0	4,5	4,31	4,86
средний	3	4	1,62	2,16	1,3	0,9	2,1	1,94
интенсивный	6	8	3,24	4,32	0,6	0,8	1,94	3,46
пиковый	12	16	6,48	8,64	0,1	0,2	0,65	1,74
Всего	-	-	-	-	24	24	9,0	12,0

Окончание таблицы 10
End of Table 10

Продолжительность работы насосов, час				Мощность, кВт	
насос №1		насос №2			
средн	макс	средн	макс	средн	макс
-	-	-	-	-	-
8,0	4,5	-	-	2,8	2,3
1,3	0,9	-	-	0,8	0,7
0,6	0,8	0,6	0,8	1,25	1,45
0,1	0,2	0,1	0,2	0,3	0,6
10	6,4	0,7	1,0	5,15	5,05

ВЫВОДЫ

1. Независимо от климатических условий, благоустройства здания, режима подачи воды, действующие нормативы в Украине превышают фактические расходы воды потребителями.

2. В ходе анализа норм водопотребления установлено, что социальная потребность в воде человека, проживающего в современном упорядоченном здании, составляет 111,3л/сутки·чел., хозяйственно-гигиеническая - 75,6 л/сутки·чел.

3. Превышение водопотребления у населения наблюдается там, где дома не оборудованные

счетчиками воды (в среднем от 20 до 86 л/сутки·чел.), а при наличии водоизмерительной арматуры - снижение затрат воды почти в два раза (от 50 до 100 л/сутки·чел.).

4. Установлена тенденция уменьшения нормы водопотребления на одного человека от увеличения состава семьи.

5. К основным факторам, влияющим на точность приборов, относятся: режим подачи воды, метрологический класс водомера и монтажное положение счетчика. С целью уменьшения величины потерь воды и гарантии точности учета необходимо выбирать водомер самого высокого

класса точности и определять для него оптимальное монтажное положение.

6. Для обеспечения надежности водоснабжения зданий повышенной комфортности и высотных домов, расположенных в районах с меньшей этажностью застройки, необходимо устанавливаться локальные станции, в состав которых входят очистные установки и подкачивающие насосные станции. Использование на станциях насосов разной производительности и гидроаккумуляторов, позволяет сократить затраты электроэнергии (до 47%) и гидравлические потери (до 0,9атм).

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Душкин С.С., 2004. Научно-техническое обоснование норм горячего и холодного водопотребления населением г. Харькова // Научный Вестник строительства. Вып. 26. – Харьков: ХДТУБА, ХОТВ АБУ.
- 2) Душкин С.С. 2003. Откуда берутся нормы водопотребления // «Вода – жизнь». - №4. – ТПО «Харьковкоммунпромвод». С. 6-7.
- 3) Жуков Н.Н., Железнова Г.Л., Орлова Г.А., 2000. Снижение потерь питьевой воды в системах коммунального водоснабжения / Водоснабжение и санитарная техника - №8 –с.14-17.
- 4) Инструкция по оценке и нормированию неучтенных расходов воды в системах коммунального хозяйства. 2000 – Москва — Госкомитет Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу, с.36.
- 5) Кожин И.В., Добровольский Р.Г., 1988. Устранение потерь воды при эксплуатации систем водоснабжения. – М.: Стройиздат. - с.350.
- 6) Лернер А.Д., 2000. Обоснование нормативов водопотребления и величины неучтенных потерь / Жилищно-коммунальное хозяйство - №6 – с.31-34.
- 7) Методика визначення нормативів питного водопостачання населення, 2005. Затверджено наказом державного комітету України з питань житлово-комунального господарства від 27 вересня 2005 р. № 148.
- 8) Методика розробки технологічних нормативів використання води на підприємствах водопровідно-каналізаційного господарства України – 1998. Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України: Київ.
- 9) Мхитарян М. Г., 1987. Факторы, определяющие полезное водопотребление в хозяйственно-питьевом водопроводе [Текст] // Водоснабжение и санитарная техника
- 10) Найманов А.Я., Гостева Ю.В., 2013. Возможности оценки некоторых параметров надежности насосных станций // MOTROL. – Commission of motorization and energetic in agriculture – Lublin – Vol.15. №6. – P. 27-34
- 11) Насонкина Н.Г., 2005. Повышение экологической безопасности систем питьевого водоснабжения. – Макеевка: ДонНАСА. – 181с.
- 12) Насонкіна Н.Г., Чумак А.В., Линдін М.В., Чумак О.А., Гутарова М.Ю. 2013. Система водопостачання будинків підвищеної комфортності // Комунальне господарство міст. – Харків. – С. 198-206.
- 13) Поршнева В.Н. 2004. Совершенствование системы учета водопотребления и расчетов за холодную, горячую воду и тепловую энергию в Москве // Энергосбережение. - №6.
- 14) Саргин Ю.И., Друскин Л.И., Покровская И.Б. и др.: под ред. Староверова И.Г. и Шиллера Ю.И., 1990. Внутренние санитарно-технические устройства. Ч 2. Водопровод и канализация – М.: Стройиздат – 247с.
- 15) Свинцов А. П., Тарасюк Л.В., Мукарзель С. А. 1998. Экспериментальная оценка нормативов водопотребления в жилых зданиях / Водоснабжение и санитарная техника - №8 - с. 10-11.
- 16) Сигин А.П., Масалов Е.В., Новикова Л.В. 2005. О совершенствовании расчетов за водопотребление. МГУП «Мосводоканал» // Энергосбережение - №7.
- 17) Слипенченко В.О., 1999. Сокращение потерь питьевой воды из систем водоснабжения. - К. - Государственный институт ЖКГ Госстроя Украины.
- 18) СНиП 2.04.01-85, 1985. Внутренний водопровод и канализация зданий – М.: Стройиздат.
- 19) Храменков С. В., Печников В. Г., 1998. Принципы расчета критериев удельного водопотребления города. / Водоснабжение и санитарная техника - №8 –с.2-6.
- 20) Храменков С.В., Поршнева В.Н., Воронова Е.Ю. 2000. Потери воды от источника до крана / Водоснабжение и санитарная техника - №11 –с.20-22.

ANALYSIS OF WATER CONSUMPTION RATES IN UKRAINE

Abstract. The analysis of water consumption rates in Ukraine for different categories of consumers has been conducted. The problems of changing norms of water depending on the comfort of housing and other factors have been considered. The factors affecting the accuracy of water meters have been analyzed.

Keywords: water supply, water consumption rate, water meter, meter reading, water consumption, water losses

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕНОПОЛИСТИРОЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ ПРИ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИИ ВОДЫ

Валерий Орлов, Сергей Мартынов, Екатерина Корнийчук

Национальный университет водного хозяйства и природопользования

Адрес: Черновола 41, Ровно, Украина.

E-mail: 26serga@ Rambler.ru

Аннотация. Рассмотрены теоретические основы обезжелезивания подземных вод. Приведена схема контактного обезжелезивания воды на пенополистирольных фильтрах с восходящим фильтрационным потоком. Представлена математическая модель контактного обезжелезивания воды на пенополистирольных фильтрах и проверена ее адекватность. Описаны результаты внедрений предложенных решений.

Ключевые слова. Обезжелезивание, пенополистирол, моделирование, фильтрование.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Деятельность человека негативно влияет на окружающую среду, в том числе, и на водные ресурсы, что приводит к значительному их загрязнению [16]. Рациональное использование водных ресурсов в условиях дефицита воды, ухудшение ее качества является сложной научно-технической и экономической проблемой [1].

В общем, подземные воды по сравнению с поверхностными являются более защищенными. Подземные водные ресурсы расположены достаточно неравномерно по территории Украины. Прогнозные ресурсы подземных вод Украины составляют около 61,7 млн.м³/сут, в том числе эксплуатационных запасов – 15,8 млн.м³/сут [2]. Резерв эксплуатационных запасов подземных вод по территориальным регионам колеблется в пределах 70...97%. При этом, лишь незначительная часть подземных вод соответствует действующим нормам на питьевую воду. Как правило, подавляющее большинство защищенных подземных источников имеет повышенное содержание железа, которое иногда сопровождается незначительным превышением содержания марганца, аммиака и довольно часто наблюдается повышенная концентрация сероводорода [21].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Железо в природных водах может находиться в виде двух- и трехвалентных ионов, коллоидов органического и неорганического происхождения и бактериального. Определение формы железа существенно влияет на выбор метода обезжелезивания [18].

Существующие методы обезжелезивания воды можно разделить на безреагентные, реагентные, ионообменные, мембранные и биохимические методы. Метод обезжелезивания воды необходимо выбирать пробным обезжелезиванием воды непосредственно у источника водоснабжения [5].

Безреагентные и реагентные методы называют еще физико-химическими методами, которые предусматривают введение окислителей железа [6, 11, 18, 27]. В первом методе этим окислителем является кислород воздуха, а во втором – в воду вводят растворы химических окислителей (хлор, озон, перманганат калия и др.). Задачей методов является перевод растворимых форм железа в малорастворимые формы Fe(OH)₃, чего достигают окислением с последующим его осаждением или, чаще, задержанием в толще фильтрующей загрузки.

В перечисленных методах железо переводится в гидроксид железа (III). При этом, может выделяться большое количество углекислого газа. Окисление железа может осуществляться путем глубокой и упрощенной аэрации. Соответственно, различают объемное и контактное обезжелезивание воды [14].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В технологических схемах подготовки питьевой воды от стоимости фильтровальных сооружений в значительной степени зависит эффективность работы всей системы и себестоимость очистки воды. В качестве зернистой загрузки фильтров используются природные и искусственные материалы: кварцевый песок, керамзит, гранитный щебень, пенополистирол, цеолит и др. [19]. Тип фильтрующей загрузки, параметры ее зерен и высота слоя существенно влияют на эффективность обезжелезивания воды, размеры фильтровальных установок и их производительность.

Одной из экономически целесообразных загрузок является пенополистирол, который имеет ряд технико-экономических преимуществ [15]. Его впервые предложено использовать в качестве загрузки скорых фильтров на кафедре водоснабжения и бурового дела УИИВХ (в настоящее время Национальный университет водного хозяйства и природопользования, Ровно, Украина). Пенополистирольная загрузка рекомендуется к использованию при подготовке воды питьевого качества действующими нормативными документами Украины [7, 25, 26].

Поэтому, разработка, совершенствование ресурсо- и энергосберегающих схем обезжелезивания воды, инженерных методов расчета очистных сооружений с пенополистирольными фильтрами чрезвычайно актуально.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Обезжелезивания подземных вод с содержанием железа до 5 мг/дм³ предполагает, в первую очередь, упрощенную аэрацию и фильтрования или иначе его можно назвать контактным обезжелезиванием. Процесс обезжелезивания заключается в окислении двухвалентного железа кислородом воздуха, образование гидроксида железа на зернах загрузки или на осадке в межзерновом пространстве фильтрующей загрузки. Необходимым условием для осуществления процесса обезжелезивания является наличие на поверхности зерен загрузки активной пленки из соединений железа, которая и становится катализатором всего процесса. Поверхность зерен фильтрующих загрузок имеет электрический заряд, напряженность поля которого на границе адсорбционного слоя характеризуется значением электрокинетического потенциала. Знак и величина потенциала, которые зависят от pH среды, влияют на сорбционную активность поверхности зерен [18, 27] по отношению к сорбируемым частицам, находящимся в воде. При фильтровании подземных вод на первом этапе происходит адсорбция ионов закисного железа на поверхности «чистых» зерен фильтрующей загрузки. Через некоторое время проходит адсорбция окисленного железа, и электрокинетический потенциал зерен загрузки снижается, уменьшаются адсорбционные свойства поверхности зерен. Вместе с тем, в воде есть растворенный кислород, под действием которого адсорбированные ионы закисного железа окисляются и гидролизуются. То есть, образуется осадок, который так же становится катализатором процесса. В осадке находится практически 100 % трехвалентного железа. После образования «пленки», сорбция ионов двухвалентного железа протекает параллельно на свободной поверхности фильтрующей загрузки и на поверхности осадка из гидроксида железа. Поглощающая способность фильтрующей загрузки зависят от удельной поверхности, т.е. чем мельче зерна и больше их коэффициент формы зерна, тем больше будет сорбироваться двухвалентного железа. Осадок, который образуется, ускоряет процесс адсорбции и окисления двухвалентного железа. На процесс окисления также влияют [18] концентрация катализатора (объем загрузки и количество накопленного осадка), скорость фильтрования, крупность зерен (она может приниматься большей, чем в процессах осветления воды), содержание двухвалентного железа.

По нашим данным необходимую высоту загрузки при обезжелезивании воды можно определить по формуле [18]:

$$L = \frac{V \cdot (d_{ек})^3}{d \cdot (d_{20})^2 \cdot \alpha \cdot K \cdot [O_2 - 2,5H_2S]} \ln \frac{[Fe]_0}{[Fe]}, \quad (1)$$

где: $[O_2 - 2,5H_2S]$ – концентрация кислорода в воде без кислорода, который нужен на окисление сероводорода при водородном показателе воды 6,8...7,0,

d – эквивалентный диаметр гранул загрузки, которая обеспечивает наилучший эффект очистки воды (может быть принят 0.8...1), мм,

$d_{ек}$ – эквивалентный диаметр гранул конкретной загрузки, мм,

d_{20} – средний диаметр гранул загрузки первого слоя, равный 20 % от общей высоты, мм,

K – коэффициент, учитывающий влияние физико-химических свойств воды, осадка и фильтрующей загрузки, ч⁻¹·дм³·мг⁻¹,

α – коэффициент формы зерна,

V – скорость фильтрования, м/ч,

$[Fe]_0, [Fe]$ – концентрация железа в подземной воде и фильтрате, мг/дм³.

Для очистки воды от ионов железа нами рекомендуется применять схему обезжелезивания воды, показанную на рис. 1. При невысокой концентрации ионов железа в подземных водах используется обычный пенополистирольный фильтр, а при значительной концентрации ионов железа – со слоем растущего взвешенного осадка и пенополистирольной загрузкой [9]. Возможно размещение воздухоотделителя и фильтра в металлической башне-колонне [17, 24]. При этом может использоваться упрощенная аэрация со свободным изливом воды в воздухоотделитель с высоты не менее 0,5 м или усиленная аэрация вакуумным аэратором [23]. При обезжелезивании воды окончание фильтроцикла обусловлено, как правило, достижением предельных потерь напора, а поэтому перевод фильтра из режима фильтрования в режим промывки и наоборот может осуществляться с помощью гидроавтоматического устройства без применения запорной арматуры [22].

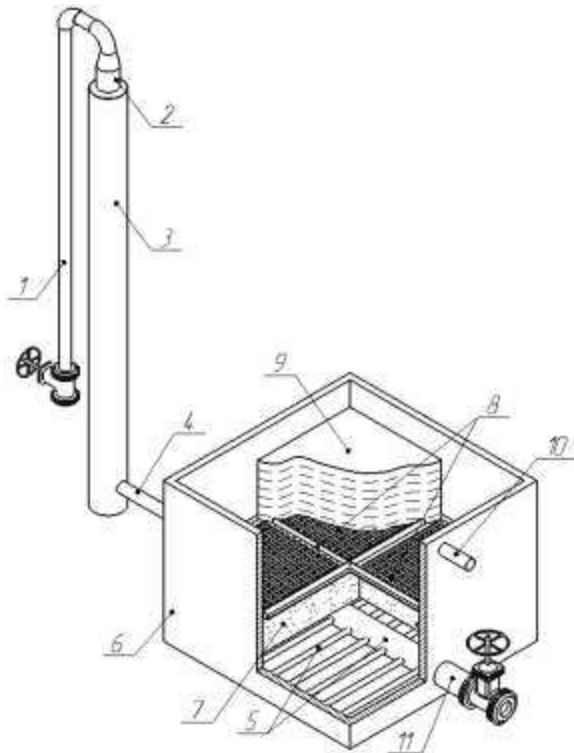


Рис. 1. Схема обезжелезивания воды аэрацией и фильтрованием на пенополистирольных фильтрах с восходящим фильтрационным потоком:

1 – трубопровод подачи подземных вод; 2 – аэратор; 3 – воздухоотделитель; 4 – трубопровод аэрированной воды; 5 – нижняя дренажно-распределительная система; 6 – корпус фильтра; 7 – пенополистирольная загрузка; 8 – удерживающая решетка; 9 – надфильтровый объем воды; 10 – трубопровод отвода обезжелезиванной воды (фильтрата); 11 – промывной трубопровод

Fig. 1. Scheme of iron removal water filtration and aeration on polystyrene filters with ascending filtering: 1 – underground water supply pipeline; 2 – aerator; 3 – air separator; 4 – aerated water pipeline; 5 – bottom distributive system; 6 – filter's body; 7 – polystyrene foam loading; 8 – retaining frame; 9 – upper part of the filter; 10 – deferrization water pipeline (filtrate); 11 – wash pipeline

Скорость фильтрования рекомендуется принимать 7...10 м/ч на фильтрах без слоя взвешенного осадка, и до 4 м/ч – со слоем взвешенного осадка. Промывка пенополистирольной загрузки обеспечивается нисходящим потоком очищенной воды с интенсивностью 10...18 л/(с·м²) в течении 3...4 мин [15, 18, 19, 21].

При обезжелезивании воды на пенополистирольных фильтрах, как правило, рассматриваются два сопутствующих процесса: эффективность очистки воды и рост потерь напора. Первый процесс является основным, а второй – сопутствующим. Нами предложена модель обезжелезивания воды, базирующаяся на двух основных блоках:

1. Осветительный (деформационный) блок – учитывает материальный баланс и кинетику протекания процесса.

2. Гидродинамический (фильтрационный) блок – описывает динамику потерь напора в зернистой загрузке.

Уравнение материального баланса можно представить следующим образом:

$$V \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

где: V – скорость фильтрования, м/ч,

$C(x,t)$ – концентрация железа, г/м³, изменяющаяся

по высоте загрузки и времени фильтрования,

x – координата (высота) слоя загрузки, м,

ρ – плотность осадка в слое загрузки, г/м³,

изменяющаяся по высоте загрузки и времени фильтрования,

t – время фильтрования, ч.

При обезжелезивании вод с отдельными воздухоотделителями и постоянным расходом, скорость фильтрования на каждом из фильтров будет постоянной, то есть $V = const$. При общем воздухоотделителе для нескольких пенополистирольных фильтров, они будут работать с убывающей скоростью. Кроме того, при промывке одного фильтра, на других скорость будет повышаться до значения:

$$V_{\text{ИР}} = V \cdot N / (N - 1), \quad (3)$$

где: N – количество пенополистирольных фильтров с общим воздухоотделителем.

Скорость фильтрования может изменяться вследствие изменения расхода воды, подаваемой на обезжелезивание, т.е. $V = f(Q)$, что характерно при многоуровневом тарифе на электроэнергию. В периоды минимальной стоимости электроэнергии фильтры работают с максимально возможной производительностью, а в периоды максимальной стоимости – работают с минимально необходимым расходом или вообще не работают. Если обезжелезивающее оборудование гидравлически связано с напорными накопителями воды (гидроаккумуляторы или водонапорные башни), то вода подается периодами, продолжительность которых зависит от водопотребления, производительности артезианского насоса и регулирующего объема. В таком случае, со временем скорость фильтрования равна расчетной или нулю. Если же фильтр работает при открытии санитарно-технических приборов, что характерно при напорном обезжелезивании воды коттеджными установками, то расход и скорость фильтрования будет зависеть от количества и степени открытия санитарно-технических приборов и изменяться от максимального возможного значения и до нуля. В

модели можно учесть первый и четвертый случай без введения дополнительных уравнений.

Для описания кинетики процесса обезжелезивания в слое пенополистирольной загрузки можно записать линейное уравнение вида:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial x} = a(x) \cdot \rho(x,t) - b(x) \cdot C(x,t), \quad (4)$$

где: $a(x)$, $b(x)$ – кинетические коэффициенты, характеризующие интенсивности отрыва и прилипания соединений железа к зернам загрузки и могут быть определены по формулам [10]:

$$a = \alpha \cdot V^{\varepsilon_1} \cdot d(x)^{\varepsilon_2}, \quad (5)$$

и

$$b = \beta \cdot V^{\varepsilon_3} \cdot d(x)^{\varepsilon_4}, \quad (6)$$

где: α , β , ε_1 , ε_2 , ε_3 , ε_4 – эмпирические коэффициенты,

$d(x)$ – эквивалентный диаметр зерен загрузки, мм.

Гидродинамический блок описывается уравнениями изменения гидравлического уклона, пористости загрузки и общих потерь напора в установке.

Как, правило, фильтрование воды происходит в ламинарном режиме, для которого справедливо уравнение Дарси:

$$V = k \cdot I = k \cdot \frac{h}{x}, \quad (7)$$

где: k – коэффициент фильтрации, м/ч;

I – гидравлический уклон, м/м, показывающий перепад давления h по высоте x загрузки.

Для определения коэффициента фильтрации чистой загрузки предложен ряд зависимостей, например, Хозена, Замарика, Слихтера, Козени-Кармана, Дюпюи-Форхгеймера, Эргана, Павчича и др. В большинстве этих формул коэффициент фильтрации зависит от пористости загрузки, поверхности гранулы и вязкости воды.

Для определения коэффициента фильтрации чистой загрузки при моделировании работы многослойных фильтров с горизонтальным движением воды [29] предлагается использовать формулу Слихтера, в которой вязкость воды учитывается через температурный коэффициент. В работе [4] коэффициент фильтрации определяется на основе формулы Эргана, которая учитывает инерционные силы и может использоваться при нелинейной фильтрации. В работе [8] отмечается, что формула Павчича может быть использована для определения коэффициента фильтрации чистой пенополистирольной загрузки.

На базе шаровой и капиллярной модели Эрган [12] для определения гидравлического уклона шарообразных частиц предложил формулу:

$$I = 4.23 \cdot 10^3 \cdot \frac{(1-m)^2 \cdot v \cdot V}{m^3 \cdot d^2} + 1.37 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{(1-m) \cdot V^2}{m^3 \cdot d}, \quad (8)$$

где: m – пористость слоя загрузки,
 V – кинематический коэффициент вязкости воды, м²/с,
 V – скорость фильтрования, м/ч,
 d – диаметр частицы, мм.

Это уравнение можно использовать и для частиц, форма которых отличается от шарообразных, если в его подставить коэффициент, учитывающий форму зерна и заменить диаметр на эквивалентный.

С достаточной точностью ($R^2=0,9981$) для температуры воды $t_B = 0...35$ °С кинематический коэффициент вязкости воды можно определить по формуле:

$$v = \left(\frac{0.0605 \cdot t_B^2 - 5.0058 \cdot t_B}{+ 176.32} \right) \cdot 10^{-8}. \quad (9)$$

Для учета изменения коэффициента фильтрации в формулы подставляется текущая пористость $m(x,t)$ или может использоваться поправочный коэффициент, и тогда, коэффициент фильтрации определяется по формуле [13]:

$$k(x,t) = k(x,0) \cdot \left(1 - \frac{\rho(x,t)}{m_0} \right)^3, \quad (10)$$

где: $k(x,0)$, $k(x,t)$ – соответственно коэффициенты фильтрации в чистой загрузке (после промывки) и в момент времени t ,

m_0 – усредненная пористость чистой загрузки.

Для определения пористости загрузки можно воспользоваться уравнением предложенным в работе [4]:

$$m(x,t) = m_0 - \frac{\rho(x,t)}{\gamma_0} - \frac{\rho(x,0)}{\gamma}, \quad (11)$$

где: $\rho(x,0)$ – концентрация загрязнений в начальный момент времени (остаточные загрязнения после промывки), г/м³,

γ , γ_0 – массовые концентрации твердых частиц в единице объема осадка до и после промывки), г/м³.

Потери напора в обезжелезивающей установке можно определить по формуле:

$$H_{Ov}(t) = H_{ПВ} + H_{AT} + H_{НДС} + H_{VP} + H_3(t), \quad (12)$$

где: $H_{ПВ}$, $H_{АТ}$, $H_{НДС}$, $H_{УР}$, $H_3(t)$ – соответственно потери напора в воздухоотделителе, трубе аэрированной воды, нижней дренажной системе, удерживающей решетке и пенополистирольной загрузке, м.

Потери напора в воздухоотделителе и трубе аэрированной воды можно определить по [28], нижней дренажной системе – по [16], удерживающей решетке – по [7].

Потери напора в пенополистирольной загрузке можно определить по формуле:

$$H_3(t) = \int_{x=0}^{x=L} I(x) dx, \quad (13)$$

где: L – общая высота загрузки, м.

Значения первых четырех слагаемых в формуле 12 не зависят от продолжительности фильтрования, то есть:

$$H_0 = H_{ПВ} + H_{АТ} + H_{НДС} + H_{УР} = const. \quad (14)$$

Тогда, окончательно:

$$H_{OY}(t) = H_0 + \int_{x=0}^{x=L} I(x) dx, \quad (15)$$

Данная модель может быть решена численным способом, используя метод продольно-поперечной прогонки. Для реализации этого метода необходимо задать или экспериментально установить следующие величины: диаметр зерен по высоте загрузки $d(x)$; пористость чистой загрузки m_0 ; температуру воды t_B ; эмпирические коэффициенты α , β , ε_1 , ε_2 , ε_3 , ε_4 ; массовые концентрации твердых частиц γ , γ_0 ; концентрацию загрязнений после промывки $\rho(x,0)$; H_0 . В зависимости от поставленной задачи дополнительно могут задаваться следующие показатели: скорость фильтрования V ; входная концентрация железа C_0 ; концентрация железа в фильтрате C_ϕ ; продолжительность фильтрования t ; общая высота загрузки L , максимальные потери напора в обезжелезивающей установке. При определении коэффициента фильтрации по формуле 10 отпадает необходимость в задании γ , γ_0 .

Проверка адекватности модели проводилась путем сравнения значений рассчитанных по модели с экспериментальными при входном концентрации $[Fe_0] = 1,0 \text{ мг} / \text{дм}^3$, скорости фильтрования $V = 7,0 \text{ м} / \text{ч}$ и высоте загрузки $L_0 = 1,0 \text{ м}$.

На рис. 2 линиями приведены потери напора в слоях загрузки 30 см, 70 см и 1 м полученные по

модели, а точками – в результате проведения лабораторных исследований. Результаты расчетов по предложенной модели хорошо согласуются с экспериментальными данными, относительная погрешность не превышает 4,8 %.

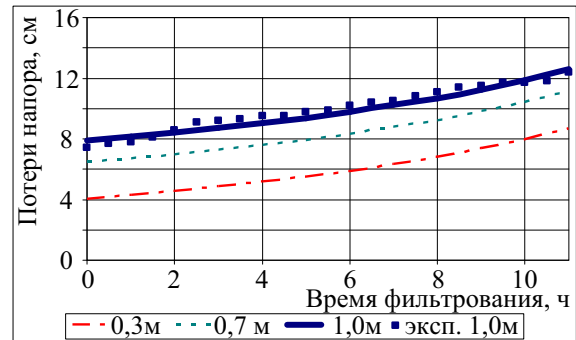


Рис. 2. Рост потерь напора со временем фильтрования при обезжелезивании воды

Fig. 2. Increasing the pressure losses with the time of filtering during deferrization

На рис. 3 показано распределение загрязнений по высоте загрузки. Основное количество загрязнений задерживается в нижних более мелких слоях загрузки.

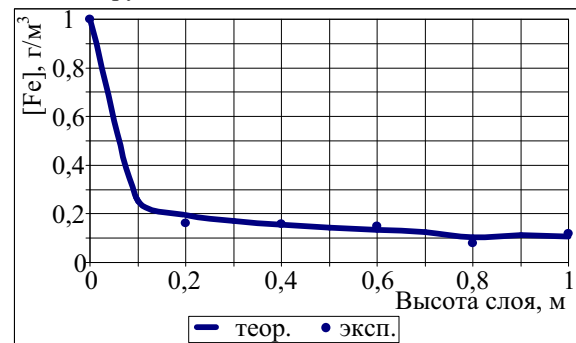


Рис. 3. Изменение концентрация железа по высоте загрузки

Fig. 3. Changing the concentration of iron with the height of the loading

Нужно отметить, что модель требует уточнения с целью учета каталитического эффекта осадка, накапливающегося в межпоровом пространстве и уточнения механизма отрыва частиц, который, по нашим данным, практически отсутствует при обезжелезивании воды. Так, на рис. 4 приведены расчетные и экспериментальные данные изменения концентрации железа в слоях загрузки со временем. На рис. 4 учтены каталитический эффект путем изменения коэффициента b в зависимости от концентрации осадка в межпоровом пространстве загрузки. Это позволило обеспечить постепенное увеличение эффективности обезжелезивания воды, что подтверждается теоретическими основами и экспериментальными данными.

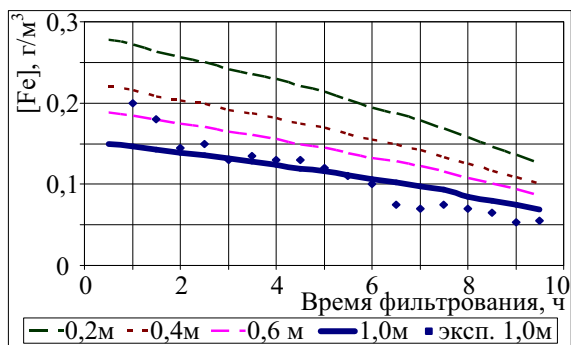


Рис. 4. Изменение концентрация железа в слоях загрузки со временем фильтрования с учетом отрыва

Fig. 4. Changing the concentration of iron in loading layers with filtering time considering tearing particles

Далее было проверено вышеприведенную зависимость без учета отрыва частиц – рис. 5. Тенденция увеличения эффективности обезжелезивания со временем снова прослеживается, однако замечается большее совпадение экспериментальных и теоретических данных, что может свидетельствовать о правильности предложенной гипотезы о практическом отсутствии отрыва частиц при контактном обезжелезивании воды.

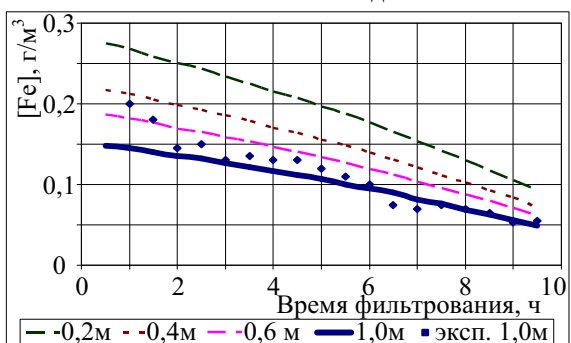


Рис. 5. Изменение концентрация железа в слоях загрузки со временем фильтрования без учета отрыва

Fig. 5. Changing the concentration of iron in loading layers with filtering time without considering tearing particles

Усложнять модель учетом различных форм железа, по нашему мнению, нецелесообразно, поскольку в предложенных схемах значительное количество железа, поступающего в загрузку, является окисным, что подтверждено экспериментальными измерениями на действующих станциях обезжелезивания воды.

В Киевской области для целого ряда населенных пунктов за нашими разработками внедрены пенополистирольные фильтры с восходящим фильтрационным потоком, расположенные на открытом воздухе. Исходная вода с концентрацией железа до 4 мг/дм^3 из скважины подается в аэратор и воздухоотделитель, а затем на два фильтра. Взаимосвязанность

надфильтровых пространства двух металлических фильтров диаметром 3 м обеспечивается трубопроводом диаметром 250 мм.

По разработанному нами проекту работает станция обезжелезивания в пгт Гоща производительностью $840 \text{ м}^3/\text{сут}$ [20]. В фильтровальной зале установлен один воздухоотделитель и четыре пенополистирольных фильтры (рис. 6) (три фильтра диаметром 1400 мм один – 1200 мм) расчетной скоростью фильтрования 7 м/час .



Рис. 6. Пенополистирольные фильтры с технологическими трубопроводами

Fig. 6. Polystyrene foam filters with technological pipelines

В первых трех фильтрах загрузка удерживается в подтопленном состоянии специальной решеткой, а в последнем – полимербетоном. Очищенная вода собирается в надфильтровом пространстве фильтров и трубопроводом, в который подается раствор гипохлорита натрия для обеззараживания, отводится в резервуары чистой воды. Вода питьевого качества забирается из резервуаров насосами второго подъема и подается в водопроводную сеть населенного пункта.

Промывка пенополистирольной загрузки осуществляется очищенной водой из объединенного надфильтрового пространства фильтров путем открытия задвижки на промывном трубопроводе.

В настоящее время одной из самых перспективных конструкций являются станции обезжелезивания башенного типа [17, 24], то есть такие, где непосредственно внутри металлической водонапорной башни установлен пенополистирольный фильтр для очистки воды. Они применяются при производительности до $200 \text{ м}^3/\text{сут}$. Работа таких башенных водоочистных установок, как и обычных водонапорных башен, непосредственно связана с работой насоса,

установленного в водозаборной скважине, т.е. фильтр работает в прерывистом режиме. На рис. 7 приведены конструктивные элементы станции обезжелезивания башенного типа.



а)



б)



в)

Рис. 7. Конструктивные элементы станции обезжелезивания башенного типа

а) воздухоотделитель; б) удерживающая решетка; в) пенополистирольная загрузка с трубопроводами подземной воды и аэрированной воды

Fig. 7. Structural elements of iron removal station tower
а) air separator; б) retaining lattice; в) polystyrene foam download with the underground water pipelines and aerated water

Нужно отметить, что транспортировка качественной воды увеличивает эксплуатационную долговечность водопроводной сети населенных пунктов [3]. Станции обезжелезивания башенного типа нами внедрены и успешно эксплуатируются в Ровенской, Хмельницкой и Винницкой областях Украины.

При наличии водонапорных башен с кирпичными стволами целесообразно в них размещать закрытые (напорные) пенополистирольные фильтры для контактного обезжелезивания воды.

ВЫВОДЫ

Итак, разработанные нами схемы обезжелезивания подземной воды с пенополистирольными фильтрами позволяют эффективно удалять соединения железа при экономии строительных и эксплуатационных затрат. Целесообразность использования предложенных схем подтверждена их внедрением во многих системах водоснабжения. Для расчета и прогнозирования работы таких сооружений разработана математическая модель.

ЛИТЕРАТУРА

1. Валкина Е., 2010. Использование методов водоочистки в новейших энергосберегающих технологиях / Е. Валкина, С. Вернези, И. Николенко, П. Богущкий // MOTROL. – Commission of motorization and energetics in agriculture : Polish Academy of sciences. – Lublin, – Vol. 12С. – 114–120.
2. Гідрологічний щорічник про стан підземних вод України. 2003 р. – К. : Державна геологічна служба, – 89 .
3. Гончаренко Д., 2013. Водопроводные сети г. Харькова и возможные пути повышения их эксплуатационной долговечности / Д. Гончаренко, А. Алейникова // MOTROL. – Commission of motorization and energetics in agriculture : Polish Academy of sciences. – Lublin – Rzeszow, – Vol. 15, №6. 3–10.
4. Гурінчік Н., 2010. Моделювання та розрахунок очищення води фільтруванням зі швидкістю, що спадає : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.04 "Водопостачання, каналізація" / Н. Гурінчік. – Одеса, – 21.
5. ДБН В.2.5-74:2013 «Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди Основні положення проектування». – К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013.
6. Золотова Е., 1975. Очистка воды от железа, марганца, фтора и сероводорода / Е. Золотова Г. Асс. – М. : Стройиздат, – 176.
7. Киселев П., 1972. Справочник по гидравлическим расчетам / П. Киселев. – М. : Энергия, – 312.
8. Киселев С., 2000. Моделирование и расчеты обезжелезивания воды на очистных фильтрах с учетом изменения гидравлических свойств загрузки : дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.04 "Водопостачання, каналізація" / С. Киселев. – К., – 158.
9. Мартинов С., 2001. Знезалізнєння води на пінополістирольних фільтрах із зростаючим шаром завислого осаду : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.23.04

- "Водопостачання, каналізація" / С. Мартинов. – Рівне, – 26.
10. Минц Д., 1964. Теоретические основы технологии очистки воды. / Д. Минц. – М. : Стройиздат, – 155 .
11. Николадзе Г., 1978. Обезжелезивание природных и оборотных вод / Г. Николадзе. – М. : Стройиздат, – 161.
12. Общий курс процессов аппаратов химической технологии :учебник. 2002. В 2 т. Т. 1 / Айнштейн В. и др. ; под ред. В. Айнштейна. – М. : Высшая школа, – 912.
13. Олейник А., Тугай А., 2001. Моделирование процессов кольматажа и суффозии в прифилтровой зоне скважины // Доповіді НАН України. — №9. –190–194.
14. Орлов В., 2011 Аераційні методи знезалізнення води / В. Орлов, С. Мартинов // «Вода і водоочисні технології». – К. : НТУУ «Київський політехнічний інститут», –42–52.
15. Орлов В., 2005. Водоочисні фільтри із зернистою засипкою. / В. Орлов. – Рівне : НУВГП, – 163.
16. Орлов В., 2011. Водопостачання та водовідведення. Підручник / В. Орлов, Я. Тугай, А. Орлова. – К. : Знання, – 359.
17. Орлов В., 2005. Знезалізнення води на установці баштового типу / В. Орлов, С. Мартинов, Н. Мінаєва // Вісник НУВГП: Збірник наукових праць. Випуск 3 (31). – Рівне : НУВГП, –307–315.
18. Орлов В., 2008. Знезалізнення підземних вод спрощеною аерацією та фільтруванням. Монографія / В. Орлов. – Рівне : НУВГП, – 158 .
19. Орлов В., 1999. Пінополістирольні фільтри в технологічних схемах водопідготовки. / В. Орлов, А. Зошук, С. Мартинов. – Рівне : РДТУ, –144.
20. Орлов В., 2011. Реконструкція водоочисного комплексу смт Гоща / В. Орлов, С. Мартинов, С. Куницький, М. Меддур // Вісник НУВГП: Збірник наукових праць. Випуск 3(55). – Рівне : НУВГП, –37–43.
21. Очищення природної води на пінополістирольних фільтрах / В. Орлов, С. Мартинов ін.; під ред. В. Орлова. Монографія. – Рівне : НУВГП, 2012. – 172 .
22. Пат. 13509 Україна, МПК С 02 F 1/64 Гідроавтоматична фільтрувальна установка / В. О. Орлов, С. Ю. Мартинов та ін. : заявник і патентовласник Національний університет водного господарства і природокористування. – № 200505931; заявл.16.06.2005 ; опубл.17.04.2006, Бюл. № 4.
23. Пат. 50767 Україна, МПК С 02 F 3/24. Аератор-дегазатор / В. О. Орлов, М. М. Трохимчук, С. Ю. Мартинов : заявник та патентовласник Національний університет водного господарства та природокористування. – № u 2009 12980; заявл. 14.12.2009 ; опубл. 25.06.2010, Бюл. №12.
24. Пат. 77541 Україна. МПК С 02 F 1/64, В 01 D 24/02. Башта-колона з пінополістирольно-кремнієвим фільтром / В. О. Орлов, С. Ю. Мартинов, Н. Л. Мінаєва, Л. М. Одуд, К. С. Мамчур : заявник та патентовласник Національний університет водного господарства та природокористування. – № u 2012 06084 ; заявл. 21.05.12 ; опубл. 25.02.13, Бюл. № 4.
25. Правила технічної експлуатації систем водопостачання та каналізації сільських населених пунктів України. ВНД 33-3.4-01-2001. – К. : Державний комітет України по водному господарству, 2000. – 141 .
26. Сільськогосподарське водопостачання. Зовнішні мережі і споруди. Норми проектування. ВБН 46 /33-2.5-5-96. – К., 1996. – 152.
27. Станкявичус В., 1978. Обезжелезивание воды фильтрованием (основы теории и расчет установок) / В. Станкявичус. – Вильнюс : Мокслас, – 120 .
28. Шевелев Ф., 1984. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб: Справ. Пособие. – 6-е изд., доп. и перераб. / Ф. Шевелев, А. Шевелев. – М. : Стройиздат, – 116.
29. Эпоян С., 2013. Выбор фильтрующей загрузки для многослойных фильтров с горизонтальным направлением фильтрации / С. Эпоян, А. Карагяур, В. Паболков // MOTROL. – Commission of motorization and energetics in agriculture : Polish Academy of sciences. – Lublin – Rzeszow, – Vol. 15, №6.11–18.

USE POLYSTYRENE FOAM FILTERS FOR WATER DEFERRIZATION

Summary. Theoretical bases deferrization groundwater considered. The scheme of the contact water deferrization on polystyrene filters with ascending filtration flow is presented. The mathematical model of the contact water deferrization on polystyrene filters presents and checked its adequacy. The results of implementation of the proposed solutions are showed.

Key words. deferrization, polystyrene foam download, modeling, filtering.

ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ 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. Представлена конструкция компактной установки для очистки дождевых сточных вод. 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, эффект очистки, песколовка, комплексная очистка, тонкослойный отстойник, модульный блок.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из острых экологических проблем функционирования городских экосистем является загрязнение городских рек стоками дренажной сети города. Территория города - это один из факторов формирования поверхностного стока, оказывающий большое влияние на химический состав поверхностных сточных вод. Для городской геосистемы формирование поверхностного стока - один из механизмов самоочищения, а для реки - один из основных источников загрязнения. Городские реки фактически становятся продолжением ливневой канализации города, являются природными очистными сооружениями. В них происходит осаждение взвешенных веществ, разбавление стоков и частичное очищение вследствие протекания разнообразных процессов [3, 9, 14, 17].

В крупных промышленных городах поверхностный сток формируется в период выпадения осадков, снеготаяния и является важнейшим источником загрязнения вод. Дренажные стоки довольно загрязнены и должны проходить хотя бы первичную очистку - отделение грубых взвесей, но в настоящее время такие мероприятия проводятся сравнительно редко. В городах, не имеющих ливневые канализации, поверхностный сток направляется в городские реки, пруды и другие водные экосистемы, в результате чего питьевое и техническое водоснабжение населенных пунктов и промышленных объектов [5] из таких водоемов практически невозможно.

Дождевые сточные воды характеризуются большим разнообразием примесей. Качество и состав поверхностного стока зависят от общей санитарной обстановки территории населенных пунктов, видов и характеристик промышленных предприятий, режима таяния вод и др. Наиболее

высокий уровень загрязнения поверхностного стока наблюдается на территориях плотной городской застройки, автомагистралях с интенсивным движением автотранспорта, территориях промышленных и автотранспортных предприятий, неупорядоченных строительных площадках [2, 20, 24].

Оседающие на покрытии автомобильных дорог: пыль, продукты износа покрытий, шин и тормозных колодок, выбросы от работы двигателей автомобилей, материалы, используемые для борьбы с гололедом, пылеподавления и т.д. приводят при смыве дождевыми и тальми водами к насыщению вод поверхностного стока различными загрязняющими веществами, в числе которых взвешенные вещества, нефтепродукты (бензин, дизельное топливо, масла, мазут и др.), которые затем могут попадать в водостоки. Если проведенные расчеты ПДС показывают необходимость очистки поверхностных сточных вод перед их сбросом в водосток, следует применять схемы поверхностного водоотвода с покрытия автомобильных дорог и мостов, обеспечивающие сбор вод поверхностного стока и направляющие их на очистные сооружения. Кроме дорог и мостов такая же необходимость возникает на АЗС, пром. площадках, предприятиях, площадках для стоянки автотранспорта, нефтеналивных терминалах и т.д.

Поверхностный сток с территории городов и промышленных предприятий является интенсивным фактором антропогенной нагрузки на природные водные объекты. Обусловлено это тем, что при существующих системах очистки хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод загрязненность водных объектов продолжает нарастать в основном за счет сброса в них поверхностного стока, так как основное количество поверхностного стока поступает в водоемы без очистки (в том числе 100 % с территорий жилых массивов), а имеющиеся на

отдельных промпредприятиях сооружения по очистке ливневых вод практически не эксплуатируются в связи с их физической и моральной изношенностью. Наиболее неблагоприятное влияние на санитарное состояние водоемов оказывают, содержащиеся в поверхностном стоке взвешенные вещества и нефтепродукты.

На интенсивность загрязненности поверхностного стока с территории населенных пунктов влияют такие факторы, как благоустройство территории, плотность населения, интенсивность движения транспорта и пешеходов. Эти показатели постоянно изменяются в процессе урбанизации. По данным многолетних исследований [13, 19, 22, 30] качество загрязнений ливневого стока городов колеблется в следующих пределах:

- взвешенные вещества - 470...2460 мг/л;
- нефтепродукты - 2...63 мг/л.

В связи с этим актуальным и важным направлением, обеспечивающим более рациональное использование водных ресурсов Украины, является разработка и внедрение новых технологических процессов очистки загрязненных дождевых вод, неэнергоемкого и высокоэффективного оборудования, обеспечивающего их осуществление.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Концентрации взвешенных веществ в дождевых, талых и мочных водах соизмерима или в несколько раз выше, чем в хоз-бытовых водах, поступающих на городские очистные сооружения, и многократно превышает значения этих показателей в сбрасываемых в водоемы очищенных хоз-бытовых водах. Особое значение имеет то обстоятельство, что как дождевой сток, так и талый отличаются неравномерностью состава загрязнений даже для однотипных производств.

Углеводородные соединения в составе нефтепродуктов (бензол, стирол, ксилол, толуол, бензапирен) обладают самостоятельными токсичными эффектами на живые организмы, в том числе мутагенного и канцерогенного характера. Попадая в водоемы, нефтепродукты образуют поверхностную пленку, препятствующую проникновению кислорода и вызывая гибель водных организмов [13, 26].

Моторные масла и смазки от стихийных утечек могут быть еще более ядовиты, чем нефтепродукты. От эксплуатации транспорта зачастую образуются опасные отходы, которые не утилизируются должным образом. Смывы с отходов просачиваются в грунт и загрязняют почву, подземные воды и поверхностные водоемы — масляные фильтры, этиленгликоль из

антифриза, металлическая пыль тормозных накладок, резина автопокрышек и т. д. [4, 13, 26]

Взвешенные вещества в составе поверхностного стока автодорог попадают в природные водоемы и вызывают такие неблагоприятные последствия как повышение мутности воды и заиление водоемов. Высокая органическая составляющая в составе взвешенных веществ ведет к росту значения химического потребления кислорода (ХПК) и затрудняет естественные процессы самоочищения природных вод [6, 25].

В соответствие с современным требованием Градостроительного кодекса, основная часть территорий городов, поселков, благоустроенных дачных поселков, стоянки, автозаправочные станции, мостовые и дорожные сооружения должна иметь инженерные системы ливневой канализации, необходимой для сбора, отведения и очистки поверхностных стоков, использующие различные методы очистки ливневых стоков: механическая, физико-химическая и др., позволяющие эффективно обезвреживать сточные воды от вредных примесей. При этом количество допустимых нефтепродуктов, которые могут поступать в стоках в водосборники и городскую ливневую канализацию строго регламентируется.

Выбор конструкции очистного сооружения зависит от климатических и гидрологических характеристик территории, а также от характеристик загрязняющих веществ.

Загрязняющие вещества разделяются по физическому состоянию (растворимые, нерастворимые, коллоидные системы) и по химическому составу. Важная характеристика взвешенных частиц, влияющая на выбор очистного оборудования — дисперсность (размер и форма частиц).

Очистные сооружения ливневых сточных вод предназначенные для очистки ливневых стоков (наружная ливневая канализация), можно разделить на несколько типов.

На очистных сооружениях последовательно реализуются все или несколько из следующих этапов очистки стоков: механическая очистка, химическая очистка, физико-химическая и биологическая очистка.

Механическая очистка предполагает удаление нерастворимых крупных примесей, а также загрязнений, находящихся в коллоидном состоянии, из поверхностных стоков. К сооружениям механической очистки относятся решетки, сита, песколовки, отстойники, нефтеловушки, фильтры, гидроциклоны, растительные полосы и др [7, 8, 13, 24, 28].

Сооружения механической очистки открывают путь стоков, поступающих на очистные сооружения. Механическая очистка удаляет из стоков крупный мусор, существенно

понижает содержание взвешенных веществ и подготавливает стоки к дальнейшим стадиям очистки.

Следующий вид - химическая очистка стоков. Химические методы применяют после механической очистки и перед поступлением стоков на биологическую очистку, либо используют как конечный этап доочистки (хлорирование, озонирование).

В качестве методов химической очистки в промышленных масштабах применяют: коагуляцию, флокуляцию, седиментацию, сорбцию [1, 10, 11, 15, 21, 29, 31, 32].

Физико-химические методы очистки относятся к глубоким стадиям очистки. Это методы флотации, адсорбции, ионного обмена, экстракции и т. д. Использование этих методов позволяет извлечь большинство токсичных химических соединений, находящихся в растворенном виде.

Биохимические методы очистки основаны на способности некоторых микроорганизмов перерабатывать растворенные химические соединения.

Биологическая очистка может быть аэробной (при активном доступе воздуха), анаэробной (бескислородной) и аноксидной (кислородное голодание).

Для очистки поверхностных стоков с автодорог и мостов наиболее перспективно устройство комплексных очистных сооружений, в которых объединяются различные очистные мероприятия и конструкции, дающие максимальный эффект очистки загрязненных стоков. К таким комплексным очистным сооружениям относятся: установка «AQUASTOK» [16]; самотечные установки очистки сточных вод "КЛЮЧ" [27] и др.

Практика показала, что последующая эксплуатация такого оборудования становится проблематичной: в некоторых случаях качество очищенных стоков не соответствует нормативным требованиям для сброса их в канализацию, а в некоторых – эксплуатация является экономически и технологически не целесообразной.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В поверхностно-ливневом стоке в значительной мере содержатся взвешенные вещества и нефтепродукты в различном фазово-дисперсном состоянии. В связи с этим для достижения требуемого эффекта очистки стоков необходимо применять комплексные системы, включающие различные методы их выделения и деструкции.

Для очистки нефтесодержащих поверхностно-ливневых сточных вод

предлагается эффективное и экономичное решение, реализованное на основе передовых технологических схем с использованием современных очистных сооружений. Для этого разработана конструкция компактного очистного сооружения, которая сочетает в себе комплекс блоков, позволяющих успешно выделить нефтепродукты и взвешенные вещества из поверхностного стока. Данная компактная установка представлена на рис. 1.

Компактная установка состоит из трубопровода 1 для подачи дождевых сточных вод в установку, песколовки 2 для выделения крупнодисперсных взвешенных веществ, блока тонкослойного отстаивания 3 для выделения взвешенных веществ, коалесцирующего блока 6 для сбора свободных нефтепродуктов, сорбционного фильтра 8 для удаления нефтепродуктов, камеры чистых стоков 9 и трубопровода 10 для отвода очищенных сточных вод.

В данной установке дождевые сточные воды самотеком поступают через трубопровод подачи сточных вод 1 поступают в блок предварительной очистки 2, где происходит выделение взвешенных веществ с гидравлической крупностью более 18 мм/с. Поток сточных вод движется вдоль лотка песколовки 2, где происходит осаждение взвешенных веществ, которые периодически отводятся вручную.

Далее предварительно осветленная сточная вода поступает в блок отстаивания 3. Данный блок оснащен тонкослойными модулями 4, по которым сточные воды двигаются снизу вверх. Осадок сползает по наклонной поверхности пластин 4, накапливается в осадочной части 5, откуда периодически выводится ассенизаторскими машинами. В блоке отстаивания 3 также происходит удаление части нефтепродуктов, так как они имеют тенденцию сорбироваться на суспензии.

Из блока тонкослойного отстаивания 3 сточные воды поступают в коалесцирующий блок 6, который размещается над тонкослойными модулями. В следствии сближения и укрупнения капель нефтепродуктов происходит накопление их на поверхности воды в коалесцирующем блоке 6 за счет меньшей плотности чем у воды. Для их удаления используется труба с отверстиями 7, через которую происходит удаление свободных и частично эмульгированных нефтепродуктов.

Через верхний перелив сточные воды из коалесцирующего блока 6 поступают в сорбционный блок 8, где происходит фильтрация через наполнитель высокой сорбционной емкости. Направление фильтрации сверху вниз. В верхней и нижней части фильтрующей колонны 8 установлены перфорированные перегородки, которые предотвращают вынос фильтрующей загрузки.

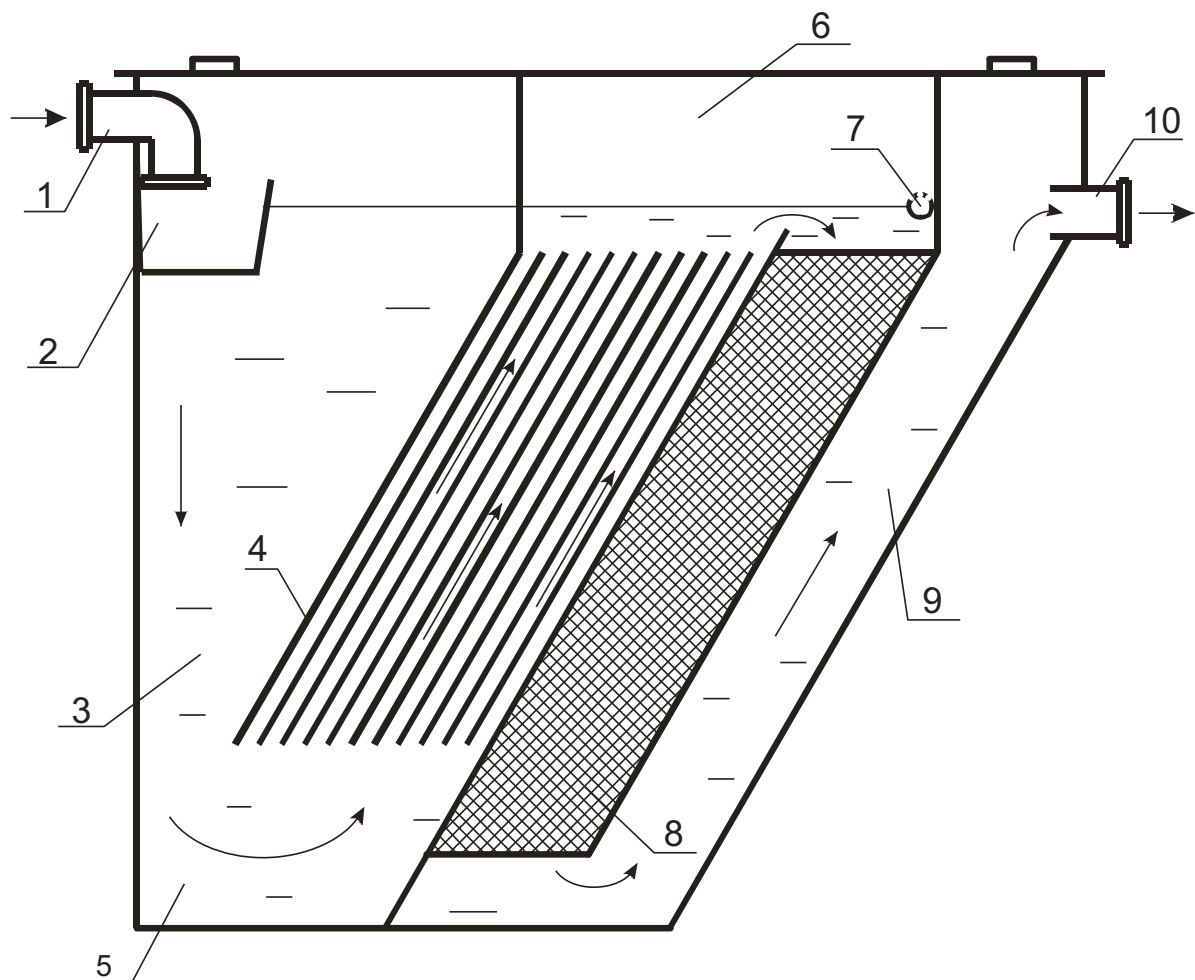


Рис. 1. Компактная установка для очистки поверхностно-ливневых сточных вод

Fig. 1. Compact system for cleaning surface storm waste water

Регенерация фильтрующей загрузки происходит по мере исчерпания сорбционной емкости, приблизительно 1 раз в год.

Очищенные сточные воды до требований ПДК поступают в камеру чистых стоков 9, откуда трубопроводом 10 отводятся к точке сброса.

В качестве фильтрующей загрузки используется вспененный пенополиуретан, химическое строение которого 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 [23, 33,34, 35].

Сорбционный фильтр заполнен измельченным эластичным пенополиуретаном марок ST 35-4.2 и EL 28-4.2 размером ребер 15 мм со средним размером ячеек 0,8 мм.

Фильтрование 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.

При обработке сточных вод происходят процессы и закономерности из которых можно отметить следующее. Дисперсный состав частиц нефтепродуктов, составляющих дисперсную фазу, является одним из факторов, влияющих на процесс фильтрования. Спектр дисперсности и концентрация дисперсной фазы определяют агрегативную устойчивость системы. Загрязнения (нефтепродукты и взвешенные вещества) находятся в сточных водах во всех видах дисперсного состояния: грубодисперсном, тонкодисперсном, коллоидном и эмульгированном состоянии.

Между частицами загрязнений и поверхностью эластичного пенополиуретана существуют силы притяжения, вызванные межмолекулярным (Ван-дер-Ваальсовым) и водородным взаимодействием и силы

электростатического отталкивания. Силы, обуславливающие связь различных компонентов нефтепродуктов между собой, при скапливании их в порах сорбента (пенополиуретана), являются преимущественно силами Ван-дер-Ваальса. Так как частички примесей в большинстве случаев имеют одинаковые заряды, вследствие этого возникают силы электростатического отталкивания. В случае, когда сила притяжения, описанная Б.В. Дерягиным [18] как сила адгезии, превалирует над силами отталкивания и происходит прилипание частицы к фильтрующей загрузке. В первую очередь происходит поглощение нефтепродуктов и взвешенных веществ, находящихся в грубодисперсном состоянии.

Полиуретаны являются гидрофобным материалом, но хорошо смачиваются нефтепродуктами, что и обуславливает интенсивное поглощение ими нефти и нефтепродуктов из воды.

Пористые пенополиуретаны эластичны и обладают высокой упругостью. Это свойство пенополиуретанов дает возможность удалять из них основную массу поглощенных нефтепродуктов механическим отжимом, после чего они могут быть повторно использованы.

Регенерация пенополиуретана происходит по мере исчерпания сорбционной емкости и производится на отжимном устройстве, которое состоит из обрезиненных отжимных барабанов (рис. 2). После того как пенополиуретан не может больше подвергаться регенерации, происходит его утилизация пиролитическим методом.

Результаты эффективности очистки поверхностно-ливневых сточных вод на блочно-модульной конструкции представлены в табл. 1.

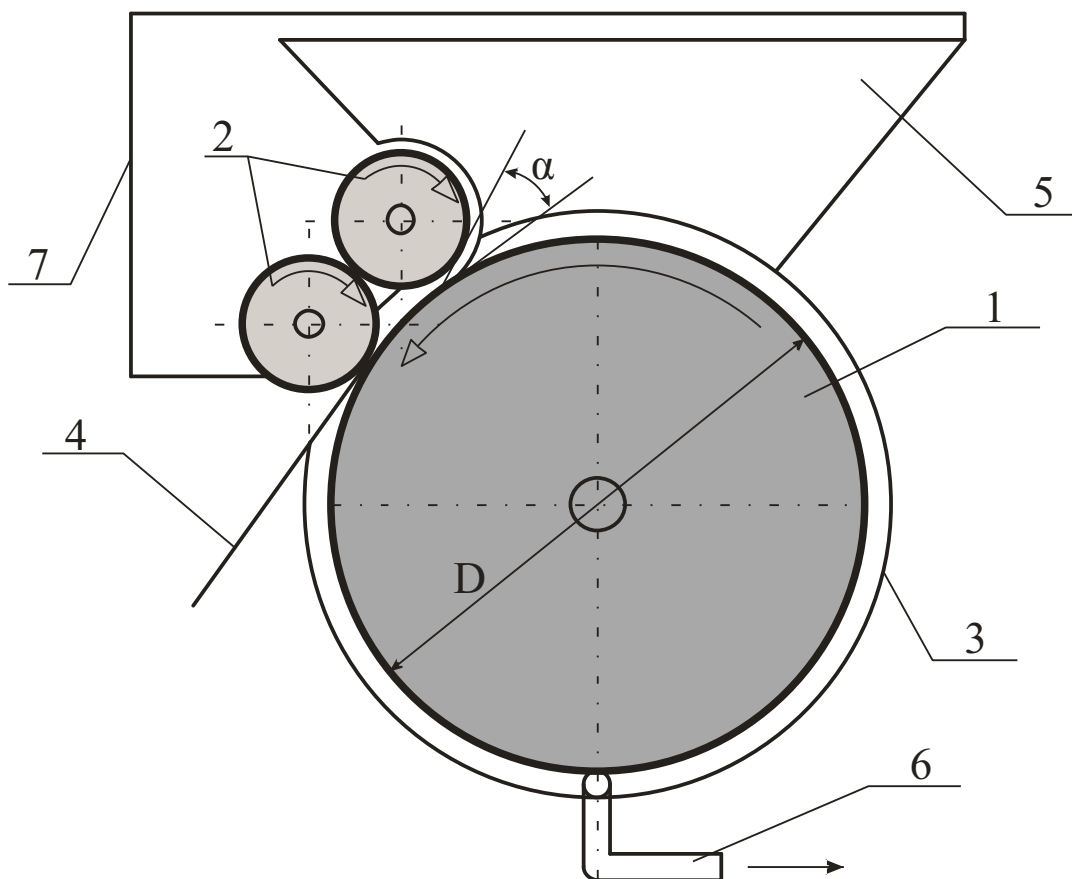


Рис. 2. Конструкция отжимного устройства

1 – ведущий барабан, 2 – ведомые барабаны, 3 – емкость для сбора регенерата, 4 – направляющий «козырек», 5 – приемный бункер, 6 – трубопровод для отвода регенерата, 7 – кожух.

Fig. 2. Construction squeezing device

1 - drive drum, 2 - driven drums, 3 - collecting container reclaim 4 - guide "visor", 5 - receiving hopper, 6 - pipe to drain reclaim 7 - cover.

Таблица 1. Качество очистки поверхностно-ливневых сточных вод**Table 1.** Quality cleaning surface storm sewage

Показатель	Исходная концентрация примесей		Концентрация примесей после очистки	
	Нефтепродукты, мг/дм ³	Взвешенные вещества, мг/дм ³	Нефтепродукты, мг/дм ³	Взвешенные вещества, мг/дм ³
минимальная	20	100	0,1	2
средняя	50	500	0,5	5
максимальная	100	1000	1	11

Степень очистки дождевых вод на данной блочно-модульной конструкции от взвешенных веществ и нефтепродуктов достигает 98-99%, остаточная концентрация в среднем составляет для взвешенных веществ – 5 мг/л и для нефтепродуктов – 0,5 мг/л, что отвечает нормативным требованиям для сброса очищенных вод в городскую канализацию.

ВЫВОДЫ

1. Дождевые, талые, поливомоечные воды, формирующиеся на территориях производственных предприятий, автомоек, городской застройки, содержат различного рода загрязнения, которые должны быть удалены перед сбросом в центральную канализацию или водоёмы. Эти сточные воды относятся к категории поверхностных, и законодательством Украины устанавливаются нормативы, до которых должны быть очищены поверхностные стоки.

2. Современный рынок очистных сооружений предлагает большой ассортимент оборудования для очистки поверхностно-ливневых сточных вод.

3. Компактная установка обладает высокой степенью очистки, обеспечивает высокую эффективность очистки, компактностью, возможностью размещения на ограниченных территориях, так как все стадии очистки объединены в единой блочно-модульной конструкции, простотой обслуживания и эксплуатации.

4. Пенополиуретан является хорошим сорбентом нефтепродуктов находящихся в сточных водах благодаря своим физико-химическим свойствам.

5. Регенерация производится механическим способом на отжимных барабанах, что позволяет повторно использовать фильтрующую загрузку

6. Разработанная установка позволяет обеспечить очистку поверхностно-ливневых сточных вод в соответствии с действующими нормами и позволяет предотвратить засорение и нарушение работы городских канализационных сетей, и загрязнение водных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Isabelle P.S., Fooks L.J., Keddy P.A., Wilson S.D. Effects of roadside snowmelt on wetland vegetation: An experimental study // Journal of Environmental Management. - 1987.
2. Demers C.L., Sage Jr. R.W. Effects of roadde-icing salt on chloride levels in four Adirondack streams // Water, Air and Soil Pollution. - 1989.
3. Fleck A.M., Lacki M.J., Sutherland J. Response by white birch (*Betula papyrifera*) to road salt applications at Cascade Lakes, New York // Journal of Environmental Management. - 1988.
4. Hofstra G., Smith D.W. The effects of roadde-icing salt on the levels of ions in roadside soils in southern Ontario // Journal of Environmental Management. - 1984.
5. Klein L.A. Sources of Metals in New York City Wastewater // I.WPCF. 1974. V.46. №12.
6. Авраменко П.М. Состояние окружающей среды и использование природных ресурсов Белгородской области в 2005г. / П.М. Авраменко, Л.В. Александрова, А.И. Анисимов, под ред. С.В. Лукина. - Белгород: Изд-во БелГУ, 2006. – 240 с.
7. Анопольский В.Н., Рогов В.М., Шборов В.А. Очистка поверхностного стока с промышленных площадок машиностроительных предприятий. // Очистка и использование поверхностного стока территорий городов и промплощадок: материалы семинара. – М.: МДНТП, 1981 – 107-112 с.
8. Баранова Л.Б., Потанина В.А., Шгондина В.С., Мясников И.Н., Захарова Н.А. Очистка промышленно-ливневых сточных вод предприятий. // Водоснабжение и санитарная техника. – 1991 – № 3 – 24-25 с.
9. Беличенко Ю.П. 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, 1981. – 3-9 с.

10. Ганбаров Э.С. Безреагентная очистка поверхностных вод с использованием электрохимического окисления и сорбции. // Водоснабжение и санитарная техника. – 2004 – № 12 – С. 21-23.
11. Гандурина Л.В., Буцева Л.Н., Штондина Л.В., Меншутин Ю.А., Фомичева Е.В., Воронов В.И. Интенсификация очистки промышленно-ливневых вод на Угрешских очистных сооружениях. // Водоснабжение и санитарная техника. – 2004 – № 5 – 17-20 с.
12. Гетманец Н.И. 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, 2011. – ч. 2 – С. 78-81.
13. Дикаревский В.С., Курганов А.М., Нечаев А.П., Алексеев М.И. Отведение и очистка поверхностных сточных вод – Л.: Стройиздат, 1990. – 224 с.
14. Діренко Г.О. 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, 2010. – 21 с.
15. Журба М.Г. Безреагентная очистка воды на фильтрах из пенополистирола. // Водоснабжение и санитарная техника. – 1971 – № 8 – 4-7 с.
16. Канализационные очистные сооружения ливневых стоков // [Электронный ресурс] – Режим доступа к информации: <http://www.promstoki.com/index.php/kosls>
17. Китаев А.Л. Очистка поверхностного стока с территории городов. // Водоснабжение и санитарная техника. – 1997 – № 2 – 25-27 с.
18. Круглицкий Н.Н. Основы физико-химической механики. – К.: Вища школа, 1975. – С.79-98.
19. Курганов А.М., Алексеев М.И., Быков А.П. Расчетная продолжительность дождей для систем водоотведения. // Водоснабжение и санитарная техника. – 1996 – №11 – С. 14-16.
20. Лапшев Н.Н., Смелов Н.Ф. Охрана водоемов Санкт-Петербурга от загрязнения сточными водами. // Водоснабжение и санитарная техника. – 1995 – № 7 – 2-4 с.
21. Лукашенко С.В., Гетманец Н.И. Процесс фильтрования через загрузку из эластичных пенополиуретанов // Экология энергоресурсосбережение, 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», 2009. – Т 2. – С. 296-299.
22. Лукашенко С.В., Гетманец Н.И. Существующие методы очистки поверхностно-ливневого стока и пути их совершенствования // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – 2009. – Вип. 51. – С. 140-143.
23. Лукашенко С.В., Гетманец Н.И., Ярошенко Ю.В. Очистка нефтесодержащих сточных вод с помощью фильтра с пенополиуретановой загрузкой // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – 2011. – Вип. 63. – С. 445-449.
24. Отстановы Н.К., Бурмистрова Л.Я., Тарнопольская М.Г. Контроль за сбросом поверхностных сточных вод в Москве. // Водоснабжение и санитарная техника. – 1993 – № 10 – 9-10 с.
25. Петин А.Н., Сердюкова Н.С., Шевченко В.Н. Малые водные объекты и их экологическое состояние. - Белгород: Изд-во БелГУ, 2005. – 240 с.
26. Проблемы больших городов. Обзорная информация – М.: ГОСИНТИ, 1980. – Вып. 20 – 28 с.
27. Производим очистные сооружения для АЗС // [Электронный ресурс] – Режим доступа к информации: <http://www.tehnosfera.ru/produktsiya/ochistnye-sooruzheniya-dlya-azs.html>
28. Свердлов И.Ш. Очистка сточных вод автозаправочных станций. // Водоснабжение и санитарная техника. – 1998 - №1 – 25-27 с.
29. Хамад Имам Ахмад Доочистка стічних вод на установках з волокнисто-пінопілістирольним завантаженням: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук: спец. 05.23.04 „Водопостачання, каналізація” / Хамад Імам Ахмад – Київ: КНУБА, 2007. – 19 с.
30. Эпоян С., Лукашенко С.В., Гетманец Н.И., 2013. Интенсификация очистки поверхностно-ливневых сточных вод. MOTROL. – Commission of motorization and energetics in agriculture. – Lublin - Rzeszów. – Vol. 15, № 6. – P. 149-156.
31. Эпоян С.М., Лукашенко С.В., Гетманец Н.И. Загрязненность поверхностного стока с селитебных территорий городов. // Сучасні проблеми охорони довкілля та раціонального використання ресурсів у водному господарстві: міжнар. наук.-практич. конф., 13-17 квітня 2010р. м. Миргород: матер. конф. – К.: Т-во «Знання» України. – 2010 – С. 48-50.
32. Эпоян С.М., Лукашенко С.В., Гетманец Н.И. 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. / УкрНДІЕП – Харків: Райдер, 2009. – Т 2. – С. 366-369.
33. Эпоян С.М., Лукашенко С.В., Гетманец Н.И. Усовершенствование очистки поверхностно-ливневых сточных вод // «Ресурсосбережение и энергоэффективность инженерной инфраструктуры урбанизированных территорий». Матер. междунар. научно-технической интернет-конф., 1-28 февраля 2013г. – Харьков: ХНАГХ, 2013 – С. 68-70.
34. Эпоян С.М., Лукашенко С.В., Гетманец Н.И. 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. – 2013. – С. 40-42.
35. Эпоян С.М., Лукашенко С.В., Гетманец Н.И., Штонда И.Ю. Влияние концентрации загрязнений на эффект очистки и продолжительность фильтрования //

«Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення» Зб. наук. статей IX міжнар. наук.-практ. конф., 9-13 вересня 2013 р. м. Алушта, АР Крим: в 2 т. – Харків: Райдер, 2009. – Т 1. – С. 293-294

TECHNOLOGY OF TREATMENT of OILCONTAINING SURFACE STORM WASTE WATER

Summary: The modern methods of superficial-storm waste water treatment are considered in the article. Some directions of surface-storm sewage improvement are considered. The structure of a compact plant for storm water treatment is shown. The results of researches on oil-containing 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, effect of treatment, sand trap, complex purification, lamellar settler, modular block.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНФРАКРАСНЫХ ВОДЯНЫХ ОТОПИТЕЛЬНЫХ ПАНЕЛЕЙ

Артем Чередник, Андрей Редько

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

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

E-mail: artemcherednic@mail.ru

Аннотация. Описана система потолочного водяного панельно-лучистого отопления, проведены экспериментальные исследования по измерению величины плотности теплового потока, температуры воздуха, температуры теплоносителя, расхода теплоносителя, подтверждающие эффективность данной системы.

Ключевые слова: лучистое отопление, плотность теплового потока.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проблема энергосбережения является одной из важнейших для строительного комплекса Украины. Одним из вариантов энергосберегающих технологий является применение потолочного водяного панельно-лучистого отопления[2,12,21].

Потолочные панели уже несколько десятилетий используются для отопления помещений высотой от 2,5 до 30 м. Область применения потолочных панелей очень широка: это могут быть различные производственные помещения, торговые залы, склады, мастерские, гаражи, спортивные залы, офисы, помещения больниц, аэропорты и многие другие объекты [14].

Главное преимущество системы потолочных панелей перед другими видами отопления – принцип излучения: энергия, излучаемая панелями, не нагревая воздух, воздействует прямо на тела, находящиеся в помещении, преобразуясь в теплоту[4,5,18]. Эта теплота передается другим телам и воздуху, благодаря чему в помещении достигается наиболее экономичное распределение энергии (за счёт излучения для ощущения комфорта достаточно температуры воздуха на 2-3 К ниже, чем при использовании традиционной конвекционной системы), (рис.1).

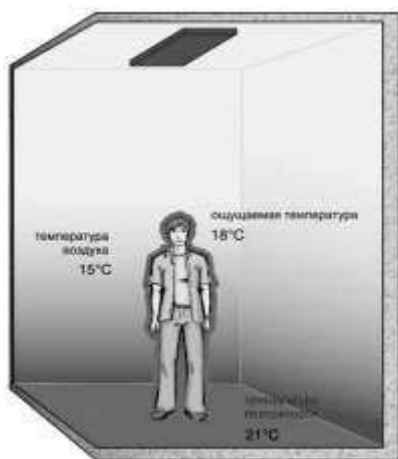


Рис.1. Отопление с помощью потолочных панелей

Fig.1. Heating via ceiling panels

А в результате равномерного распределения тепла и отсутствия конвективных процессов – здоровый и комфортный климат без сквозняков и пыли[20]. Это особенно важно для различных видов производства с повышенным образованием пыли, например, в деревообрабатывающей промышленности[16,17].

Использование потолочных излучающих панелей в сложных проектах позволяет сразу решить многие проблемы: поверхность панелей может быть гладкой или перфорированной для лучшего поглощения шума, с отверстиями под встроенные светильники и противопожарные датчики или с защитной решёткой от ударов мячей. Все потолочные панели лучевого отопления имеют высококачественное эмалевое покрытие. Кроме того, существуют варианты исполнения для помещений с повышенной влажностью и для встройки в фальш-потолки из гипсокартона. Если важна эстетика помещения, коллекторы панелей могут быть закрыты декоративной блендой, которая позволит установить в панелях дополнительное оборудование (датчики пожарной сигнализации, светильники, динамики и т.д.).

При сочетании потолочных инфракрасных панелей с вентиляционным оборудованием необходимо соблюдать требуемые скорости перемещения воздуха в рабочих зонах помещения и зонах временного пребывания людей.

Виды подключения потолочных панелей (рис.2):

- асимметрическое и симметрическое подключение. При свободном расположении панелей возможно асимметрическое подключение к трубопроводу. Если же панели установлены в подвесной потолок, рекомендуется симметрическое подключение с целью достижения равномерного расширения панели.

- одностороннее и разностороннее подключение. Обычно определяется исходя из конструктивных условий и расположения подвода теплоносителя.

Число параллельных труб определяется в соответствии с необходимым для данной панели массовым потоком.

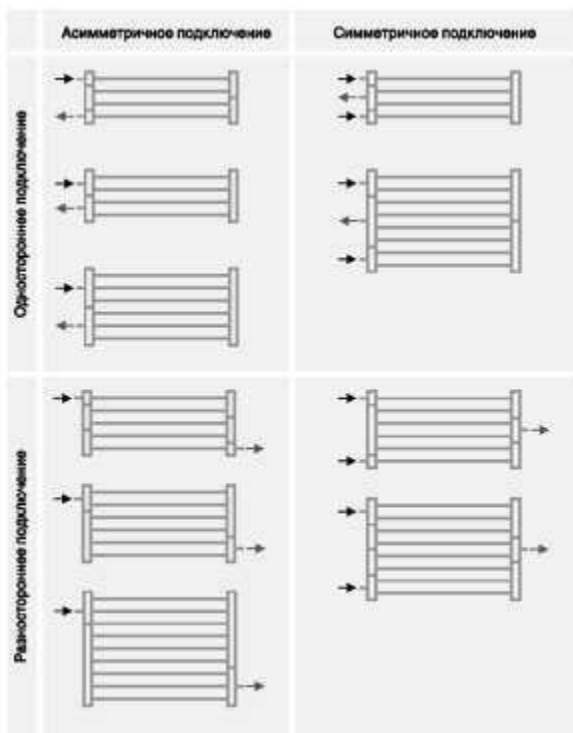


Рис.2. Виды подключения потолочных излучающих панелей

Fig.2. Types of connection radiant ceiling panels

В системах лучистого отопления возможно автоматическое регулирование системы (рис.3):

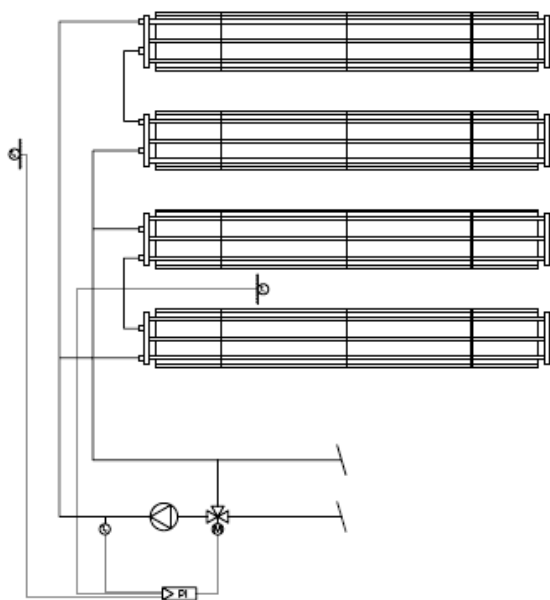


Рис.3. Регулирование температуры подающей линии с компенсацией температуры в помещении в зависимости от изменения внешней температуры

Fig.3. Regulation of the flow temperature compensated room temperature depending on the outdoor temperature changes

Составляющие данной системы:

- датчик температуры подающей линии;
- датчик внешней температуры;
- датчик температуры в помещении;
- регулятор температуры подающей линии с компенсацией температуры в помещении в зависимости от изменения внешней температуры;
- исполнительный элемент.

В качестве теплоносителя в потолочных излучающих панелях используется тёплая или горячая вода (от 40°C до 120°C), которая передаёт теплоту трубам и излучающему экрану.

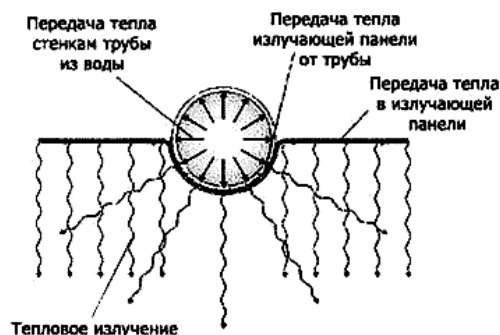


Рис.4. Принцип действия водяных панелей

Fig.4. Principle of operation of water panels

Нагретый экран начинает излучать волны в инфракрасном диапазоне. Так как потолочная панель покрыта сверху изоляцией, всё излучение идёт только вниз. Волны при соприкосновении с телами и поверхностями в помещении преобразуются в тепло (рис.4).

Нагретые таким образом тела также в свою очередь начинают излучать тепло, а также передавать его воздуху посредством конвекции. За счёт этого в помещении достигается ровный температурный профиль.



Рис.5. Внешний вид панели лучистого отопления (модель Zehnder ZIP)

Fig.5. Appearance panel radiant heating (model Zehnder ZIP)

В наше время достаточно много компаний занимается производством водяных лучистых панелей, такие как: ZEHNDER, KAMPMANN GMBH, BOKI, KROBAT, Билюкс и др. Одной из самых известных компаний является немецкая фирма ZEHNDER (рис.5) [1].

Потолочные излучающие панели характеризуются низкой тепловой инерционностью и обеспечивают короткое время реагирования, что позволяет существенно уменьшить энергозатраты. А так как инфракрасное излучение проходит сквозь воздух практически без потерь энергии (оно не нагревает воздух), а превращается в тепло непосредственно в рабочей зоне, такой вид отопления является наиболее эффективным и экономичным для помещений с большой высотой потолка.

Один из важнейших аргументов в пользу потолочных панелей перед другими видами оборудования - это высокий коэффициент полезного действия. Использование водяных потолочных инфракрасных панелей позволяет экономить до 40% энергии по сравнению с другими водяными или воздушными отопительными системами. И при этом гарантирует создание оптимального климата в помещении.

Экономия энергии возникает вследствие двух особенностей работы потолочных панелей. Во-первых, так как ощущаемая человеком температура является средним арифметическим температуры воздуха и температуры поверхностей (пола, стен и т.п.) в помещении, то при прямом нагреве этих поверхностей мы можем снизить температуру воздуха, оставив ощущаемую температуру на том же уровне. Вследствие незначительной разницы между температурой воздуха и температурой окружающей среды теплопотери сводятся к минимуму. Во-вторых, благодаря минимальному температурному градиенту уменьшается расход энергии на отопление помещения.

Потенциал сбережения энергии:

- Температура воздуха может быть на 3К ниже, чем при использовании традиционного оборудования.

- Стратификация воздуха очень мала.

- Короткое время нагрева помещения.

- Свободный выбор источника энергии; возможность использования альтернативных источников энергии: тепловых насосов; тепла, возникающего вследствие различных технологических процессов.

При использовании потолочных инфракрасных панелей тепловое излучение направляется сверху вниз в помещение. Распределение тепла в помещении зависит от его размеров, температуры поверхности и расположения панелей. Преимущество водяных

панелей: очень равномерное распределение тепла благодаря невысокой рабочей температуре и большой площади поверхности. При применении других систем с очень высокими температурами поверхности неизбежно возникновение температурных пиков и провалов.

Если в помещении уже имеется отопление, то с помощью потолочных панелей можно слегка повысить температуру в некоторой отдельной области. Обогрев отдельной зоны с соблюдением критериев теплового комфорта при отсутствии другого отопления невозможен.

Более высокая степень комфортности тепловой обстановки в помещении достигается за счет следующих мероприятий:

- повышения уровня радиационной температуры помещения. Это позволяет понизить температуру воздуха и, следовательно, улучшить конвективную теплоотдачу организмом человека, что при повышенной теплозащите одежды (в холодное время года) воспринимается человеком комфортно;

- равномерного распределения температуры воздуха по высоте помещения (рис. 6) [10] и отсутствия перегрева верхней зоны и недогрева нижней зоны помещения, что наблюдается при отоплении с помощью нагрева воздуха помещения (рис. 7) [10].

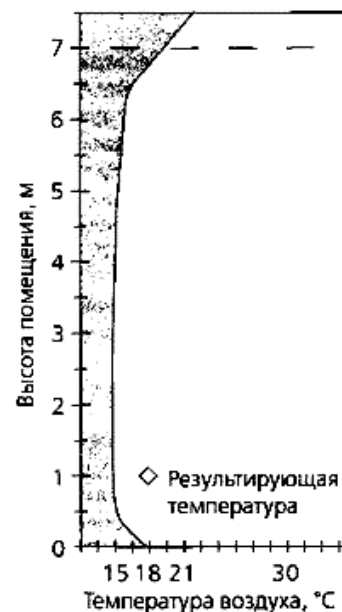


Рис.6. Вертикальный профиль температуры в помещении, отапливаемом панелями (а - температура на высоте 1 м от пола помещения, измеренная шаровым термометром).

Fig. 6. The vertical profile of temperature in the room, heated panels (a - the temperature at a height of 1 m above the floor space measured ball thermometer).

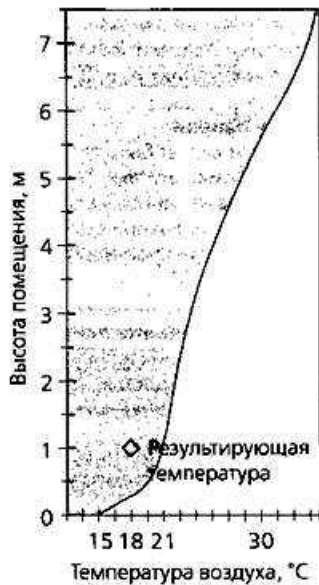
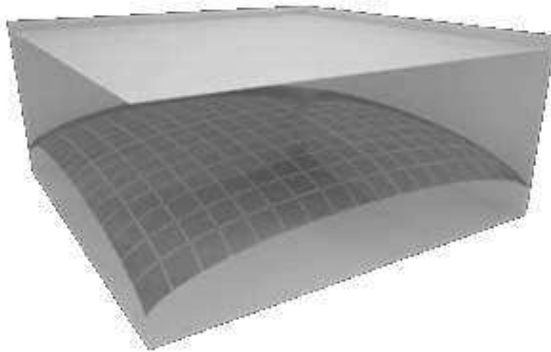


Рис.7. Вертикальный профиль температуры в помещении, отапливаемом воздушной системой (а - температура на высоте 1 м от пола, измеренная шаровым термометром)

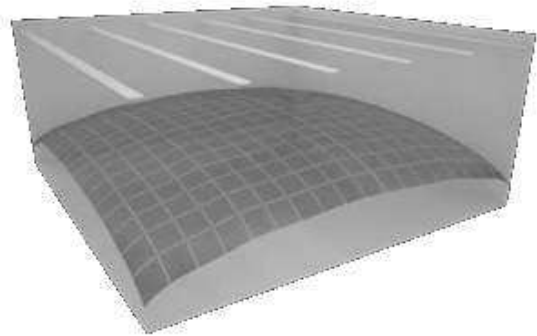
Fig. 7 - The vertical profile of temperature in the room, a heated air system (а - the temperature at a height of 1 m above the floor, measured ball thermometer).

Распределение интенсивности излучения в помещении, в зависимости от расположения панелей лучистого отопления (рис.8 а-е):



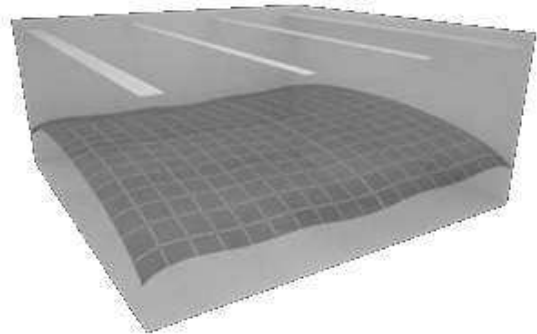
а) Полностью покрытый панелями потолок: неравномерное распределение интенсивности излучения с максимумом в центре помещения.

a) Fully covered with paneled ceiling uneven distribution of the radiation intensity with a maximum in the center of the room.



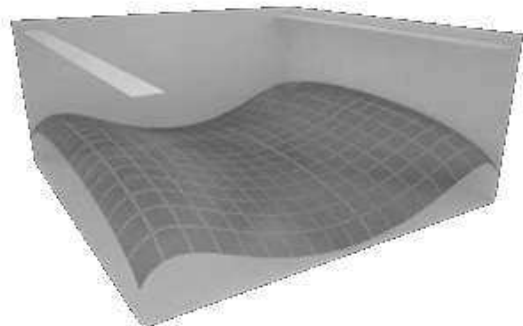
б) Шесть одинаковых панелей, расположенных с равными промежутками по всей ширине помещения: неравномерное распределение интенсивности излучения с сильным понижением у наружных стен.

b) Six identical panels, evenly spaced across the width of space: the uneven distribution of the radiation intensity with a strong decrease in the exterior walls.



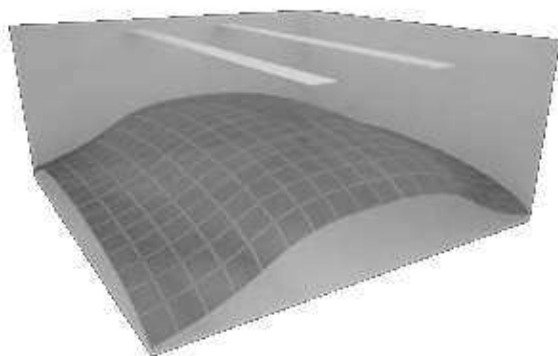
в) Две широкие панели, расположенные вдоль наружных стен, и две узкие панели в центре помещения: оптимальное распределение интенсивности излучения по всей площади помещения.

c) Two wide panels along the exterior walls, and two narrow panels in the center of the room: the optimal intensity distribution over the entire area of the room.



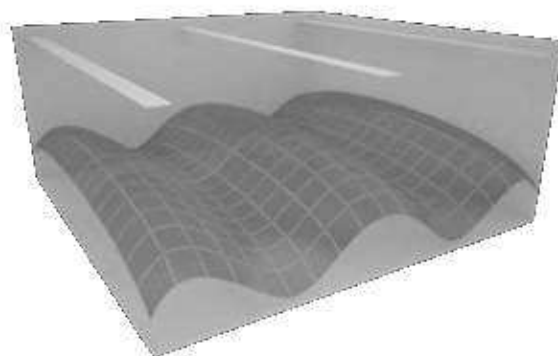
г) Две одинаковые панели, расположенные вдоль наружных стен: неравномерное распределение интенсивности излучения с максимумом у наружных стен.

d) Two identical panels along the exterior walls of uneven distribution of the radiation intensity with a maximum at the outer walls.



д) Две одинаковые панели, расположенные в центре помещения: неравномерное распределение интенсивности излучения с максимумом в центре помещения.

e) Two identical panels located in the center of the room: the uneven distribution of the radiation intensity with a maximum in the center of the room.



e) Три одинаковые панели, две расположены вдоль наружных стен, одна в центре помещения: неравномерное распределение интенсивности излучения с максимумами в центре помещения и у наружных стен.

f) Three identical panel, two are located along the outer walls, one in the center of the room: the uneven distribution of the radiation intensity with maxima in the center of the room and exterior walls.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Для оценки параметров систем лучистого отопления необходимо выполнить подробный расчет распределения лучистого тепла по внутренним поверхностям помещений, а также определять уровень облученности находящихся в них людей или животных с учетом закономерностей лучистого теплообмена. Наиболее полно закономерности лучистого теплообмена применительно к задачам строительной теплофизики рассмотрены В.Н. Богословским. Так, в монографии «Строительная теплофизика» [7] приведены основные зависимости и данные о распределении лучистого тепла по внутренним поверхностям ограждающих конструкций. В технической и справочной

литературе, например [3,11,19,22], имеются формулы и графики для расчета угловых коэффициентов облучения для конкретных условий взаимного расположения поверхностей, участвующих в теплообмене. Непосредственное использование этих формул для расчетов распределения лучистого тепла по поверхностям помещений весьма трудоемкая работа даже для компьютерных расчетов. Методики расчета лучистого отопления приводятся в справочном пособии Л.Д. Богуславского [8] и в справочнике проектировщика [6]. Конструктивные решения систем лучистого отопления и результаты исследований физиологического действия его на людей освещены в [13]. Для упрощения расчетов предложены вспомогательные материалы (таблицы, графики). Однако эти методики весьма сложны и разработаны для определенных типов нагревательных панелей, параметров теплоносителя и т.д. Поэтому применение их для практических расчетов зачастую не представляется возможным. Так в [9] были исследованы тепловые режимы панельных трубчатых излучателей с температурой 100-250 °С для водяных и теплоносильных систем радиационного отопления.

Общие требования к проектированию систем панельно-лучистого отопления:

Системы отопления должны быть рассчитаны на обеспечение в отапливаемых помещениях при расчетных параметрах наружного воздуха для соответствующих районов строительства и в течение отопительного периода температуры внутреннего воздуха в допустимых пределах, установленных в ГОСТ 30494-96 для жилых и общественных зданий и в ГОСТ 12.1.005-88 для административно-бытовых и производственных зданий, а также с учетом требований СНиП 41-01-2003.

Температуру теплоносителя следует принимать не менее чем на 20 % ниже температуры самовоспламенения веществ, находящихся в помещении. Горячие поверхности отопительного и вентиляционного оборудования, трубопроводов и воздуховодов, размещаемых в помещениях, в которых они создают опасность воспламенения газов, паров, аэрозолей или пыли, следует изолировать, предусматривая температуру на поверхности теплоизоляционной конструкции не менее чем на 20 % ниже температуры их самовоспламенения.

Отопительное и вентиляционное оборудование, трубопроводы и воздуховоды не следует размещать в указанных помещениях, если отсутствует техническая возможность снижения температуры на поверхности изоляции до указанного уровня.

Температуру поверхности панелей для обогрева отдельных рабочих мест не следует принимать выше 60°С.

Система отопления должна быть рассчитана на постоянное рабочее давление теплоносителя, но не менее 0,4 МПа при расчетной температуре теплоносителя. Пробное давление воды превышает рабочее давление в системе отопления в 1,5 раза, но не менее 0,6 МПа при постоянной температуре воды 95°C.

Система считается выдержавшей испытание, если в течение 5 мин, когда она находится под пробным давлением, потери давления не превысят 0,02 МПа и будет отсутствовать тяга в сварных швах, трубах, резьбовых соединениях, арматуре, отопительных приборах и оборудовании.

Комфортные параметры микроклимата при использовании систем панельно-лучистого отопления следует принимать по ГОСТ 30494-96 и СНиП 41-01-2003. Результирующую температуру помещения при использовании систем панельно-лучистого отопления на постоянных рабочих местах принимают равной нормируемой температуре воздуха в обслуживаемой зоне помещения. При этом температура воздуха в обслуживаемой зоне помещения не должна быть более чем на 3°C ниже результирующей температуры помещения, а поверхностная плотность лучистого теплового потока на рабочем месте не должна превышать 35 Вт/м².

Значение температурного напора при отоплении может быть рассчитано арифметически или может быть взято из таблиц [1]:

$$t_i = t_E = \frac{(t_U + t_L)}{2},$$

$$\Delta t_{uber} = \frac{(t_{HVL} + t_{HRL})}{2} - t_i,$$

$t_i = t_E$ - температура в помещении (°C) = ощущаемая температура (°C),

t_U - температура ограждающих конструкций (°C) = среднему арифметическому температур поверхностей предметов в помещении и температуры ограждающих поверхностей (°C),

t_L - температура воздуха (°C),

Δt_{uber} - температурный напор при отоплении (K),

t_{HVL} - температура подающей линии при отоплении (°C),

t_{HRL} - температура обратной линии при отоплении (°C).

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

На базе кафедры теплогазоснабжения вентиляции и использования вторичных энергоресурсов была спроектирована и

смонтирована экспериментальная установка с использованием потолочной панели фирмы Zenhder (Рис.9). Характеристики отопительной панели: ширина - 320 мм.; длина 3000мм.; материал панели - сталь; максимальная рабочая температура - 120 °C ; максимальное избыточное рабочее давление - 10 бар. Данная установка позволяет смоделировать фрагмент системы радиационного водяного отопления, применить известные в этой области методики испытаний, получить экспериментальные данные, которые можно будет использовать для усовершенствования лучистого отопления.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Методика измерения включала определение следующих параметров: плотности радиационного потока, температуру теплоносителя, температуру воздуха, расход теплоносителя.

С помощью радиометра энергетической освещенности РАТ-2П были измерены плотность радиационного потока в зависимости от температуры теплоносителя и высоты подвеса панели, мощность системы в зависимости от расхода и температуры воды. Так же были проведены температурные измерения воздуха в рабочей и нерабочей зонах.

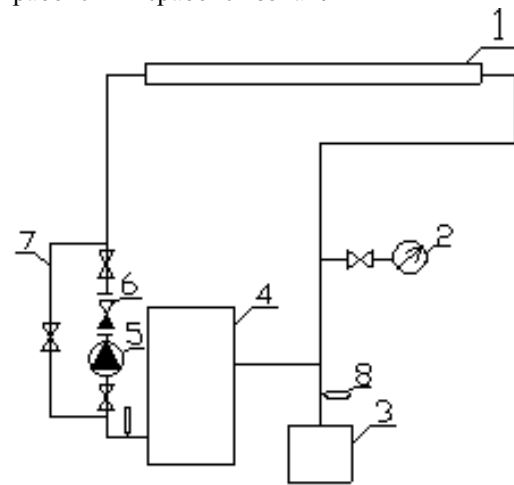


Рис. 9. Экспериментальная установка системы лучистого отопления (1- панель лучистого отопления; 2- водомер горячей воды; 3- расширительный бак; 4- котёл; 5- циркуляционный насос; 6- фильтр; 7- байпас; 8- термометр)

Fig. 9. Experimental setup radiant heating system

Результаты экспериментально полученных данных значения плотности радиационного потока в зависимости от температуры теплоносителя и температуры помещения представлены в таблице и на рисунках 10,11.

Таблица 1. Экспериментальные данные значения плотности радиационного потока (E Вт/м²)

Table 1. Experimental data values radiative flux density (E W / m²)

°C	H, м	1	1,5	2	2,5	3
50		26	16	11	8	7
60		33	21	14	9	8
70		45	25	15	10	8
80		52	31	17	12	10
90		65	39	27	19	15

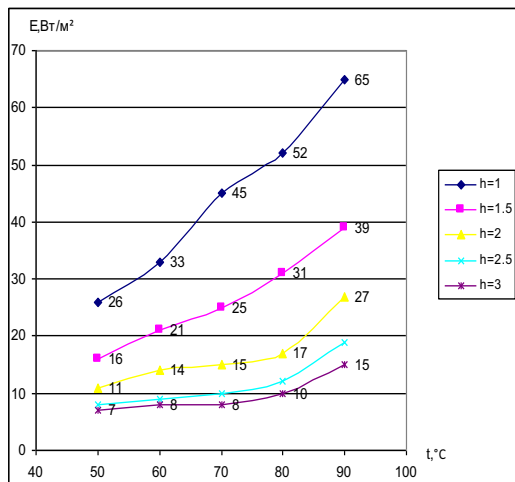


Рис. 10. Значение плотности теплового потока в зависимости от температуры теплоносителя

Fig. 10. Heat flux value depending on the temperature of the coolant

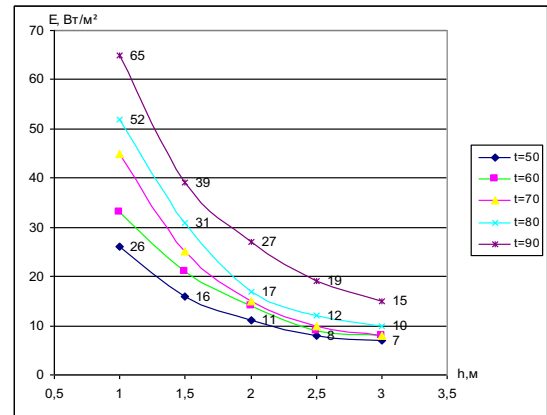


Рис. 11. Значение плотности теплового потока по высоте помещения

Fig. 11. Meaning of the heat flux density on the height of the room

В результате экспериментов и математической обработки данных было получено уравнение регрессии радиационного потока от температуры теплоносителя и высоты помещения [15]:

$$E = t \times 1,193887 + h^{-1} \times 30,489 + t \times h^{-1} \times 0,23045 + 7,06636 \text{ Вт/м}^2(1)$$

Точность полученного уравнения регрессии находится в пределах $\pm 10\%$.

Диапазон изменения переменных:

$$50 \leq t \leq 90 \text{ } ^\circ\text{C}; 0 \leq h \leq 3,5 \text{ м.}$$

На рис.12 показана поверхность плотности излучения от температуры теплоносителя и от высоты подвеса панели.

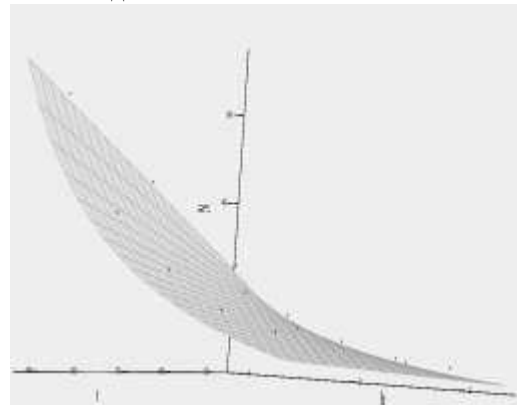


Рис.12. Поверхность плотности излучения
Fig.12. The surface density of the radiation

ВЫВОДЫ

Результаты экспериментов и обработки данных показали эффективность использования потолочного лучистого водяного отопления в производственных и административных помещениях, получено уравнение регрессии зависимости плотности теплового потока от температуры теплоносителя и высоты помещения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zenhder ZBN. Система потолочного отопления и охлаждения. Техническая документация.— 62 с.
2. Абакумов В.А. Перспективы систем инфракрасного отопления /В.А. Абакумов, Т.В.Коваль //Промышленная энергетика. 2002. – №4. – С.35-37.
3. Банхиди А., Мачкаши Л. Лучистое отопление. – М.: Стройиздат, 1985. – 464 с.
4. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжкова Л.Н. Теплообмен излучением. Справочник. Энеоатомиздат, М., 1991. – 431 с.
5. Блох А.Д. Основы теплообмена излучением. – М, Госэнергоиздат, 1967. – 331 с.
6. Богословский В.Н., Крупнов Б.А., Сканави А.Н. и др. Внутренние санитарно-технические устройства. В 3 ч., ч 1. Отопление. Изд. 4-е, перераб. и доп. — М.: «Стройиздат», 1990. — 344 с.
7. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). Учебник для вузов. — М.: «Высшая школа», 1982. — 415 с.
8. Богуславский Л.Д. и др. Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха. Справ. пособие.— М.: «Стройиздат», 1990. — 183 с.
9. Видиборец Н.М. Панельные трубчатые излучатели для систем радиационного отопления и охлаждения//Научно-технический сборник: КНУСА, 2011. -вып. 11. — с. 37-42.
10. Герасимов В.Н. Инфракрасный обогрев – один из способов выхода из энергетического кризиса /В.Н. Герасимов, В.И. Дрыгин //Энергосбережение. – 2001. – №7. – с. 6-7.
11. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача.— М.: «Энергия», 1981. — 416 с.
12. Инфракрасные системы отопления //МТТ. Мир техники и технологий. – 2005. –№8. – с. 66-67.
13. Миссенар Ф.А. Лучистое отопление и охлаждение. — М.: «Стройиздат», 1961. — 299 с.
14. Отопление цехов и залов // Энергетика: РЖ / ВИНТИ. – 2004. – № 11. – 04.11–22 С. 302. – Реф. ст.: Wer die Wahl hat, hat hier nicht die Qual // Stahl markit. – 2004. – Bd. 54, N 2. – S.54-55. – Нем.
15. Редько А., Редько А., Компан А., Павловский С., 2013. Математическое моделирование параметров утилизационной энергетической установки с органическим теплоносителем. MOTROL. – Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences. – Lublin. 2013. – Vol. 15–№6. – pp. 51–58.
16. Сканави А.И. Отопление. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1988. – 416 с.
17. СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование. – М.: ФГУП ЦНС, 2004. ~25 с.
18. Сперроу Э.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением. – Л.: Энергия, 1971. – 356 с.
19. Справочник проектировщика. Внутренние санитарно-технические устройства. 4.3. Отопление. Под ред. И.Г. Староверова и Ю.И. Шиллера. – М.: Стройиздат, 1990. – 422 с.
20. Худенко А.А. Рациональное использование энергии в строительстве. – К.: Будівельник, 1980. – 143 с.
21. Шумилов Р.Н. Лучистое отопление – мифы и реальность /Р.Н. Шумилов, Ю.И. Толстова, А.А. Поммер // С.О.К. Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2006. – № 1. – с.56,58.
22. Шумилов Р.Н., Толстова Ю.И., Поммер А.А. Совершенствование методики расчета инфракрасного отопления. Материалы международной научно-технической конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции». – М: Изд. МГСУ, 2005. – 107-112 с.

WATER EFFICIENCY INFRARED HEATING PANELS

Summary. A system of water ceiling radiant panel heating, experimental studies on the measurement of the density of heat flow, air temperature, coolant temperature, coolant flow rate, confirming the efficiency of the system.

Key words: radiant heating, heat flux density.

НАДЕЖНОСТЬ ОХЛАДИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ОБОРОТНОГО 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. Разработан метод и даны примеры расчета надежности охладительных систем оборотного водоснабжения металлургического производства на примере сталелитейного завода. Показана возможность расчета надежности водопроводного комплекса, который включает циркуляционную насосную станцию, градирни, напорную и самотечную водопроводную сеть.

Ключевые слова: охладительные системы оборотного водоснабжения, надежность.

ВВЕДЕНИЕ

По назначению воду в промышленном производстве делят [1] на четыре категории и используют ее как:

– **I категория** – **теплоноситель** при охлаждении промышленных агрегатов или продукта через стенку теплообменника; при этом вода только нагревается и не загрязняется.

– **II категория** – **среда для транспортирования** механических и растворенных примесей (при очистке сырья или продукта, обогащении, литье, удалении золотшлаков и т.д.); при этом вода только загрязняется и не нагревается.

– **III категория** – **теплоноситель и среда для транспортирования** механических и растворенных примесей (при непосредственном и одновременном охлаждении, литье, обогащении, очистке сырья или продукта); при этом вода нагревается и загрязняется.

– **IV категория** – **непосредственный технологический продукт**; при этом, как правило, требуется специальная подготовка воды.

В зависимости от способа использования воды и местных технико-экономических условий строят следующие системы производственного водоснабжения:

– **прямоточные** – вода, которая отработала на производстве, сбрасывается в водоем без очистки или с предварительной очисткой ее на очистных сооружениях; при этом вода используется единоразово;

– **с последовательным (каскадным) использованием воды** – вода, которая отработала в одном технологическом процессе, используется повторно в другом процессе, а потом сбрасывается в водоем без очистки или с предварительной очисткой на очистных сооружениях; при этом вода последовательно используется два, реже три раза;

– **оборотные** – вода, которая отработала в технологическом процессе, соответственно обрабатывается и вновь возвращается на производство; при этом вода используется в технологическом процессе многократно;

– **смешанные** – на промышленном предприятии существуют, обычно, как отдельные циклы, так и

последовательные и прямоточные схемы использования воды на производстве.

Воду I категории в системе оборотного водоснабжения перед повторным использованием только охлаждают. Назовем такие системы водоснабжения охладительными системами оборотного водоснабжения (ОСОВ). Воду II категории в системе оборотного водоснабжения только очищают от загрязнений, а воду III категории в системах оборотного водоснабжения сначала очищают, а потом охлаждают.

Принцип действия схемы охладительной системы оборотного водоснабжения (ОСОВ) состоит в многократном повторном использовании воды в технологическом процессе. Учитывая то, что вода в технологическом процессе только нагревается, для возвращения ее в оборотный цикл требуется только охлаждение.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Водоснабжение промышленных предприятий представляет собой значительную и неотъемлемую часть во всей отрасли водоснабжения. Поэтому многие ученые направляли свои усилия на решение проблем, которые возникают в производственном водоснабжении. Часть из таких исследований относится к системам в целом, например работы Н.Н. Абрамова [1], А.Ф.Шабалина [23, 24], Кучеренко Д.И. [11], Вахлера Б.Л. [3], Серикова Н.Ф. [5], Андоньева С.М. [2] и др. Значительное количество работ посвящено исследованию отдельных сооружений, например работы Гладкова В.А. [7], Гончарова В.В. [8], Фарфоровского Б.С. [20], Вахлера Б.Л. [4], Семенюка В.Д. [6] и др. Вопросы надежности систем производственного водоснабжения рассматривались в целом, предлагались методы структурного резервирования отдельных сооружений и элементов, но количественной оценки по современным показателям надежности не выполнялось. Объясняется это тремя основными причинами – во-первых, методы современной теории надежности еще только начинают проникать в различные отрасли техники и, в том числе, в водоснабжение; во-вторых, классические методы

математической теории надежности достаточно сложны и для внедрения их в инженерную практику требуется разработка соответствующих инженерных методик расчета; в-третьих, расчеты надежности можно вести только в том случае, когда накоплена соответствующая (репрезентативная) база статистических данных по надежности отдельных элементов. Однако, практика эксплуатации систем производственного водоснабжения промышленных предприятий показывает, что необходимости четкого учета повреждаемости не уделяется должного внимания оборудованию отдельных водопроводных сооружений. Отдельно можно отметить только работу д-ра техн. наук В.С. Пономаренко [15] в которой даны количественные показатели надежности отдельных элементов вентиляторных градирен.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Надежность водоснабжения, как технологического процесса, определяет надежность отдельных сооружений системы водоснабжения промышленного предприятия. При это необходимо, в первую очередь, решить [13] следующие задачи.

Во-первых, учитывать то, что надежность – это комплексное свойство объекта или сооружения, которое включает четыре составляющих этого свойства: безотказность, ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость; необходимо определить какие из этих четырех свойств являются определяющими и подлежат анализу.

Во-вторых, перед расчетами показателей надежности надо сначала определиться с тем, какие показатели надежности следует использовать. Показателей надежности достаточно много, но надо из них выбрать основные для конкретных сооружений и элементов и разрабатывать методику расчета именно этих показателей.

В-третьих, методика расчета надежности по своей сложности не должна превышать сложности технологических гидравлических расчетов и только тогда расчеты надежности войдут составной частью в технологические расчеты водопроводных сооружений.

В-четвертых, следует особое внимание уделить точности исходных статистических данных по надежности отдельных элементов водопроводных сооружений. В противном случае, точность значений надежности водопроводных сооружений и систем, полученных в результате расчетов, может быть сомнительной.

Целью данной работы есть изложение предложенного метода и, разработанной на его основе, методики расчета надежности систем производственного водоснабжения промышленных предприятий на примере системы оборотного водоснабжения металлургического, а именно – сталелитейного завода.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Принципиальные схемы охладительных систем оборотного водоснабжения

В качестве охлаждающих сооружений в ОСОВ используют следующие сооружения:

- водохранилища (пруды) – охладители;
- брызгальные бассейны;
- градирни.

Для создания движения воды в оборотном цикле строят специальные циркуляционные насосные станции (ЦНС), которые могут иметь одну или две группы насосов. Схему ОСОВ с одной группой насосов охлажденной воды (НОВ) используют на тепловых и атомных электростанциях (рис.1).

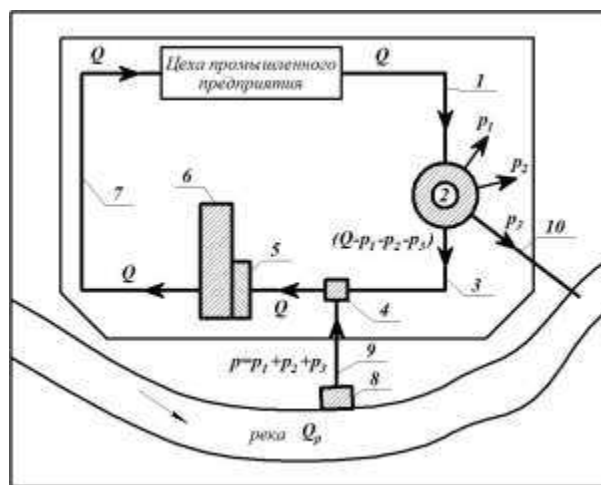


Рис. 1 Схема охладительной системы оборотного водоснабжения с одной группой насосов в циркуляционной насосной станции:

- 1 – напорный водовод нагретой воды;
- 2 – охладитель воды; 3 – самотечный водовод охлажденной воды; 4 – камера добавочной воды;
- 5 – камера охлажденной воды; 6 – циркуляционная насосная станция; 7 – напорный водовод охлажденной воды; 8 – водозабор и насосная станция добавочной воды; 9 – водовод добавочной воды; 10 – самотечный водовод продувочной воды;
- p_1 – потери воды на испарение;
- p_2 – потери воды на капельный унос;
- p_3 – потери воды на продувку системы оборотного водоснабжения

Fig. 1 Scheme of the cooling circulating water supply system with one group pumps in the circulation pumping station:

- 1 – penstock heated water; 2 – cooling tower;
- 3 – gravity conduit chilled water; 4 – camera make-up water; 5 – camera chilled water; 6 – circulating pumping station; 7 – penstock chilled water; 8 – water intake and pumping station of water added; 9 – conduit make-up water; 10 – gravity conduit blowdown water;
- p_1 – loss of water through evaporation;
- p_2 – loss of water droplet entrainment;
- p_3 – loss of water blowdown of circulating water supply system

На большинстве промышленных предприятий используют схему ОСОВ с двумя группами насосов в ЦНС. Группа насосов нагретой воды (ННВ) забирает воду из камеры нагретой воды (КНВ) и подает ее в охладитель. Затем охлажденную воду насосы охлажденной воды (НОВ) забирают из камеры охлажденной воды и подают ее в цеха промышленного предприятия (рис. 2).

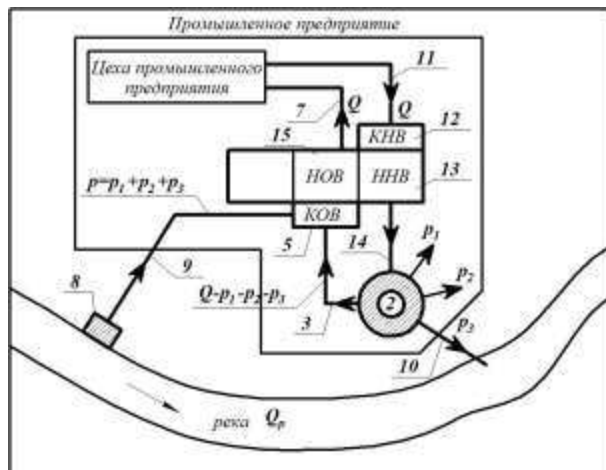


Рис. 2 Схема охладительной системы оборотного водоснабжения с двумя группами насосов в циркуляционной насосной станции:

- 11 – самотечный водовод нагретой воды;
- 12 – камера нагретой воды; 13 – группа насосов нагретой воды; 14 – напорный водовод нагретой воды; 15 – группа насосов охлажденной воды

Fig. 2 Scheme of the cooling circulating water supply system with two groups of pumps in the circulation pumping station:

- 11 – gravity conduit heated water; 12 – camera heated water; 13 – a group of pumps heated water;
- 14 – penstock heated water; 15 – a group of pumps chilled water

Анализ схем производственного водоснабжения показывает, что отдельные водопроводные сооружения образуют комплекс взаимодействующих и взаимосвязанных водой сооружений. С точки зрения надежности, эти сооружения образуют цепь последовательно соединенных восстанавливаемых элементов. Эту цепь сооружений можно построить как для прямоточных, так и для оборотных систем производственного водоснабжения. Сооружения охладительных систем оборотного водоснабжения с двумя группами насосов в циркуляционной насосной станции (рис. 2) могут быть представлены следующей цепочкой сооружений (рис. 3).

Поэтому, для оценивания надежности систем производственного водоснабжения нужно анализировать надежность цепи водопроводных сооружений по направлениям подачи воды отдельным потребителям (цехам).



Рис. 3 Цепь сооружений по направлению “ЦЕХ – ЦНС – ОХЛАДИТЕЛЬ – ЦНС – ЦЕХ”:

- B5C – самотечный водовод нагретой воды, обратный; B5H – напорный водовод нагретой воды;
- B4C – самотечный водовод охлажденной воды, обратный; B4H – напорный водовод охлажденной воды, подающий

Fig. 3 Chain structures in the direction of “WORKSHOP – CPS – COOLER – CPS – WORKSHOP”:

- B5C – gravity conduit heated water, reverse; B5H – penstock heated water; B4C – gravity conduit chilled water, reverse; B4H – penstock chilled water, supply; CPS – circulating pumping station

Охладительные системы оборотного водоснабжения сталелитейных заводов

Вода в металлургическом производстве используется в основном (70...75%) для охлаждения металлургических печей, что обеспечивает нормальный ход технологического процесса и стойкость деталей металлургических агрегатов, которые работают в зонах высоких температур. Обычно, при водяном охлаждении устраивают охладительную систему оборотного водоснабжения (ОСОВ), которая обеспечивает, с одной стороны эффективное охлаждение конструкций и деталей металлургических печей, а с другой – защиту поверхностных водных источников от загрязнения. При этом, вода используется повторно многократно, а из источника забирается свежая вода только для покрытия безвозвратных, для системы оборотного водоснабжения, потерь.

Процесс водяного охлаждения деталей металлургических агрегатов сводится к передаче тепла от нагретой стенки детали к холодной воде. При этом вода незначительно нагревается, но ее агрегатное состояние не изменяется. Охлаждение происходит за счет конвективного теплообмена, когда на смену нагретой воде поступает охлажденная вода. Таким образом, необходимость непрерывного движения воды ставит технологический агрегат в зависимость от надежности как ОСОВ, так и системы электроснабжения. Перерыв в подаче воды даже на несколько минут может привести к значительным авариям металлургических печей и больших материальных потерь, если не предусмотрены меры по повышению надежности.

Развитие электросталеплавильного производства обусловлено возможностью переработки до 100% металлолома, практически на месте его образования. В дуговых печах прямого действия [22] электрическая дуга горит между электродами и расплавленным металлом, непосредственно нагревая металл (рис. 4).

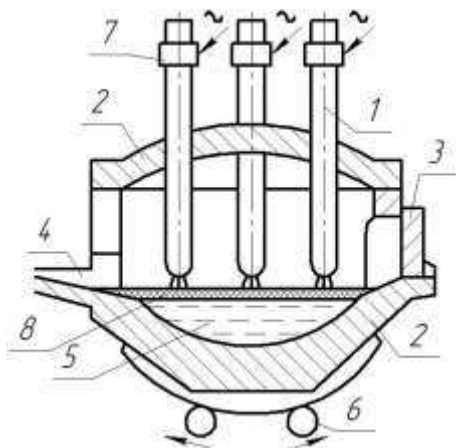


Рис. 4 Схема электрической дуговой печи прямого действия:

- 1 – электрод; 2 – свод; 3 – рабочая дверца;
4 – лётка для выпуска жидкой стали; 5 – жидкая сталь; 6 – механизм наклона; 7 – электродержатель;
8 – жидкий шлак

Fig. 4 Scheme electric arc furnace of direct action:

- 1 – electrode; 2 – set; 3 – working the door;
4 – taphole for tapping molten steel; 5 – molten steel;
6 – tilt mechanism; 7 – electrode; 8 – molten slag

Дуговая сталеплавильная электропечь (ДСП) предназначена для производства стали широкого сортамента из шихты, состоящей из подготовленного стального лома и необходимых добавок. Для примера, ДСП-50 (рис. 5) имеет [26] следующие технические параметры: номинальная емкость 50 т; мощность трансформатора 40 МВ·А; напряжение высокой стороны 35 кВ; напряжение низкой стороны 200...570 В; максимальный ток электрода 55 кА; число фаз – 3; частота тока 50 Гц; диаметр графитовых электродов 500 мм; рабочий ход электродов 3500 мм. По принципу действия электропечь принадлежит к трехфазным дуговым электропечам прямого действия с зависимой электрической дугой.

Печь состоит из стального кожуха цилиндрической формы со сферическим днищем. В середине кожуха имеет огнеупорную футеровку, а плавильное пространство закрывается сверху съёмным сводом. Печь имеет рабочее окно и выпускное отверстие со сливным желобом. Нагрев и плавление стали осуществляется мощными электрическими дугами, которые горят между концами трех электродов и металлом, который находится в печи. Перед загрузкой печи свод поднимают вверх к консоли портала, а потом консоль портала со сводом и электродами поворачивают на 90° в сторону сливного желоба и печь загружают с помощью бады.

Система водяного охлаждения дуговой печи состоит из распределителей (коллекторов), сливных воронок и труб. Вода подается в нижнюю часть водяной рубашки, а отводится из самой высокой

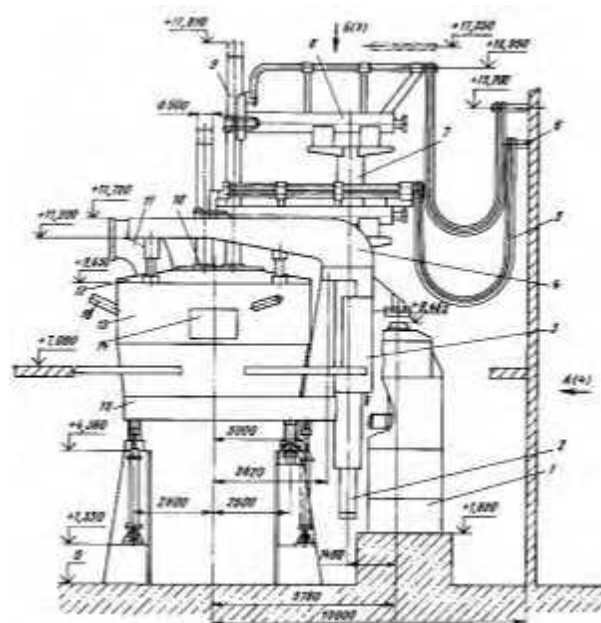


Рис. 5 Общий вид электропечи ДСП-50

- 1 – толкатель поворотный; 2 – подвеска портала; 3 – портал; 4 – консоль; 5 – установка кабельных гирлянд; 6 – мост; 7 – стойка; 8 – держатель электрода; 9 – электрод; 10 – уплотнение электродного отверстия; 11 – газоотсос; 12 – свод; 13 – кожух; 14 – рабочее окно; 15 – платформа наклоняющаяся

Fig. 5 General view of electric furnace DSP-50

- 1 – rotary pusher; 2 – suspension of the portal; 3 – the portal; 4 – console; 5 – installation of cable garlands; 6 – bridge; 7 – front; 8 – electrode holder; 9 – electrode; 10 – electrode seal holes; 11 – gas suction; 12 – set; 13 – casing; 14 – operating window; 15 – tilting platform

Оборотной водой охлаждаются следующие элементы дуговой электрической печи [17]: стеновые водоохлаждаемые панели (рис. 6); экономайзеры (холодильники) для уплотнения электродных отверстий; П-образная арка (рама) и заслонка загрузочного (рабочего) окна; кольцо свода; патрубков отведения дымовых газов; гибкие кабели вторичного токопровода; медные трубины, которые подсоединены к головкам электродержателей, которые зажимают электроды.

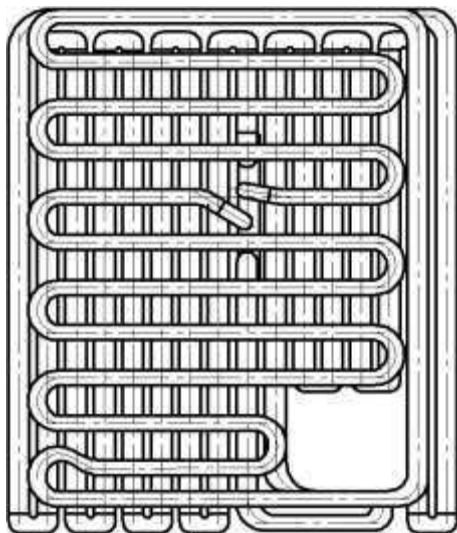


Рис. 6. Трубчатая водоохлаждаемая панель с фронтальным змеевиком

Fig. 6. Tubular water-cooled panel with front coil

Выделение свойств надежности, которые анализируются

Свойство сохраняемости не является определяющим, когда анализируется надежность функционирующей системы производственного водоснабжения. Это свойство является определяющим в том случае, когда рассматриваются изделия или объекты, которые находятся на хранении.

Свойство долговечности в данном случае не рассматривается в предположении, что элементы и сооружения системы производственного водоснабжения еще не достигли предельного состояния, когда дальнейшая их эксплуатация технически и экономически нецелесообразна. Предполагается, что установленная система технического обслуживания и ремонта позволяет поддерживать элементы и сооружения в работоспособном состоянии, а те из них, которые достигли предельного состояния, снимаются с эксплуатации и заменяются новыми.

Определяющими для функционирующих систем водоснабжения промышленных предприятий являются два свойства надежности – безотказность и ремонтпригодность. От этих свойств сооружений системы производственного водоснабжения напрямую зависит бесперебойность и восстанавливаемость водоснабжения отдельных цехов. Поэтому в данной работе предлагается метод и, разработанная на его основе, методика расчета безотказности и ремонтпригодности системы водоснабжения, которые определяют бесперебойность и восстанавливаемость водоснабжения как технологического процесса.

Выбор основного и базисных показателей надежности

Последствия отказов системы водоснабжения проявляются в виде ущербов, которые несут потребители 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 $t_{доп}$ [12].

В сталелитейном производстве перерыв в подаче воды на время больше допустимого $t_{доп}$ приводит к значительным материальным потерям. Однако, наличие структурного резерва – независимого трубопровода технической воды – позволяет выполнить переключение на резервный источник водоснабжения за время меньше допустимого $t_{доп}$. Поэтому, потребители воды в сталелитейном производстве оговаривают только частоту и продолжительность перерыва в подаче воды. Исходя из изложенного, целесообразно в качестве основного показателя надежности принять коэффициент готовности K_G или противоположный ему коэффициент простоя $K_{П} = 1 - K_G$. Коэффициент готовности K_G представляет собой “свертку” двух базисных показателей надежности – средней наработки на отказ T и среднего времени восстановления T_B :

$$K_G = \frac{T}{T + T_B}$$

Коэффициент готовности – это комплексный показатель, который учитывает одновременно и безотказность (показатель T), и ремонтпригодность (показатель T_B) системы водоснабжения.

Расчет надежности охлаждающих систем оборотного водоснабжения

Цепь водопроводных сооружений и элементов на сталеплавильный цех представлена на рис. 7.

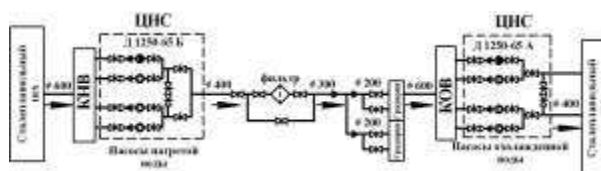


Рис. 7. Технологическая схема системы оборотного водоснабжения на сталеплавильный цех

Fig. 7. Technological scheme of circulating water supply system for steelmaking shop

Расчет безотказности выполняем путем вычисления параметра потока отказов ω и обратной

величины – наработки на отказ $T = 1/\omega$. Параметр потока отказов трубопроводов и градирен вычисляем как для последовательно соединенных восстанавливаемых элементов. Параметр потока отказов ЦНС определяем методом “вкладов” [12]. Среднее время восстановления рассчитываем как средневзвешенную по вкладам величину.

Параметр потока отказов водопроводной сети на сталеплавильный цех:

$$\begin{aligned}\omega_c &= \omega_{0cn} l_{cn} + \omega_{0cc} l_{cc} + 8\omega_{zc} = \omega_{cn} + \omega_{cc} + 8\omega_{zc} = \\ &= 0,25 \cdot 10^{-4} \cdot 0,368 + 0,011 \cdot 10^{-4} \cdot 0,409 + 8 \cdot 0,15 \cdot 10^{-4} = \\ &= 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ 1/час,}\end{aligned}$$

где: $\omega_{0cn} = 0,25 \cdot 10^{-4}$ 1/час – удельный параметр потока отказов напорной сети [21];

$\omega_{0cc} = 0,011 \cdot 10^{-4}$ 1/час – удельный параметр потока отказов самотечной сети [9];

$l_{cn} = 0,368$ км; $l_{cc} = 0,409$ км – длина, соответственно, напорной и самотечной сети;

ω_{cn} , ω_{cc} , ω_{zc} – параметр потока отказов, соответственно, напорной и самотечной водопроводной сети, сетевой задвижки ($\omega_{zc} = 0,15 \cdot 10^{-4}$ 1/час [10]).

Среднее время восстановления работоспособности водопроводной сети:

$$\begin{aligned}T_B &= \frac{\omega_{cn} T_{B_{cn}} + \omega_{cc} T_{B_{cc}} + 8\omega_{zc} T_{B_{zc}}}{\omega_{cn} + \omega_{cc} + 8\omega_{zc}} = \\ &= \frac{(0,25 \cdot 0,368 \cdot 8 + 0,011 \cdot 0,409 \cdot 8 + 8 \cdot 0,15 \cdot 10) \cdot 10^{-4}}{(0,25 \cdot 0,368 + 0,011 \cdot 0,409 + 8 \cdot 0,15) \cdot 10^{-4}} = \\ &= 9,8 \text{ час,}\end{aligned}$$

где: $T_{B_{cn}}$, $T_{B_{cc}}$, $T_{B_{zc}}$ – среднее время восстановления, соответственно, напорной и самотечной водопроводной сети, сетевой задвижки [10].

Отказ фильтра не производит к отказу ОСОВ так как при его отказе закрываются две задвижки – перед фильтром и за ним, затем открывается задвижка на байпасной линии и вода движется в обход фильтра.

В летний жаркий период времени в работе должно находиться одновременно две градирни, поэтому, с точки зрения надежности, они соединены последовательно. Параметр потока отказов одной градирни ω_2 рассчитываем как для последовательно соединенных восстанавливаемых элементов:

$\omega_2 = \omega_6 + \omega_{vc} = (0,45 + 0,08) \cdot 10^{-4} = 0,53 \cdot 10^{-4}$, 1/час, где: ω_6 , ω_{vc} – параметр потока отказов соответственно вентилятора и водораспределительной системы [15].

Тогда параметр потока отказов блока из 2-х градирен рассчитывается как сумма параметров потока отказов обеих градирен: $\omega_{6c} = 2\omega_2 = 2 \cdot 0,53 \cdot 10^{-4} = 1,06 \cdot 10^{-4}$, 1/час.

Наработка на отказ блока градирен:

$$T = \frac{1}{\omega_{6c}} = \frac{1}{1,06 \cdot 10^{-4}} = 9434 \text{ час.}$$

Технологическая схема обвязки насосных агрегатов ЦНС трубопроводами и арматурой приведен на рис. 8. Изначально, в ЦНС было предусмотрено 2 рабочих и 2 резервных насосных агрегата. Со временем производительность ОСОВ уменьшилась и сейчас в работе находится 1 рабочий и 3 резервных насосных агрегата. Расчет надежности ведем методом вкладов [12].

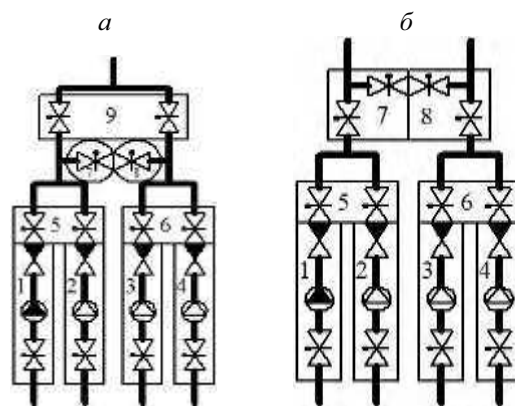


Рис. 8. Циркуляционная насосная станция: а – группа насосов нагретой воды; б – группа насосов охлажденной воды

Fig. 8. Circulation pumping station: а - a group of pumps heated water; б - a group of pumps chilled water

Параметр потока отказов укрупненных элементов группы насосов нагретой воды ЦНС:

$$\begin{aligned}\omega_1 &= \omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = \omega_{zv} + \omega_n + \omega_k = \\ &= (0,1 + 1,25 + 0,08) \cdot 10^{-4} = 1,43 \cdot 10^{-4}, \text{ 1/час;} \\ \omega_5 &= \omega_6 = 2\omega_{zn} = 2 \cdot 0,6 \cdot 10^{-4} = 1,2 \cdot 10^{-4}, \text{ 1/час;} \\ \omega_7 &= \omega_8 = \omega_{znk} = 0,1 \cdot 10^{-4}, \text{ 1/час;} \\ \omega_9 &= 2\omega_{znk} = 2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-4} = 0,2 \cdot 10^{-4}, \text{ 1/час,}\end{aligned}$$

где: ω_{zv} , ω_n , ω_k , ω_{zn} , ω_{znk} – параметр потока отказов, соответственно, задвижки на всасывающей линии, насосного агрегата, обратного клапана, задвижки на напорной линии, задвижки на напорном коллекторе [12].

Вклады укрупненных элементов:

$$\begin{aligned}\nu_5 &= \omega_5 (\hat{E}_{i_6} + \hat{E}_{i_8}) = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (1,2 \cdot 10^{-3} + \\ &+ 0,2 \cdot 10^{-3}) = 1,68 \cdot 10^{-7}, \text{ 1/÷\text{äñ,}} \\ \hat{E}_{i_6} &\cong \omega_6 \hat{O}_{A_6} = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot 10 = 1,2 \cdot 10^{-3}, \\ \hat{E}_{i_8} &\cong \omega_8 \hat{O}_{A_8} = 0,1 \cdot 10^{-4} \cdot 20 = 0,2 \cdot 10^{-3}, \\ \nu_6 &= \omega_6 (\hat{E}_{i_5} + \hat{E}_{i_7}) = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (1,2 \cdot 10^{-3} + \\ &+ 0,2 \cdot 10^{-3}) = 1,68 \cdot 10^{-7}, \text{ 1/÷\text{äñ,}}\end{aligned}$$

$$K_{П5} \cong \omega_5 T_{B5} = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot 10 = 1,2 \cdot 10^{-3};$$

$$K_{П7} \cong \omega_7 T_{B7} = 0,1 \cdot 10^{-4} \cdot 20 = 0,2 \cdot 10^{-3};$$

$$\nu_7 = \omega_7 K_{П6} = 0,1 \cdot 10^{-4} \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} = 0,12 \cdot 10^{-7}, 1/\text{час};$$

$$\nu_8 = \omega_8 K_{П5} = 0,1 \cdot 10^{-4} \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} = 0,12 \cdot 10^{-7}, 1/\text{час};$$

$$\nu_9 = \omega_9 = 0,2 \cdot 10^{-4}, 1/\text{час}.$$

Параметр потока отказов группы насосов нагретой воды.

$$\omega_{ННВ} = \nu_5 + \nu_6 + \nu_7 + \nu_8 + \nu_9 = (1,68 + 1,68 + 0,12 + 0,12 + 200) \cdot 10^{-7} = 203,6 \cdot 10^{-7}, 1/\text{час}.$$

Наработка на отказ группы насосов нагретой воды:

$$T = \frac{I}{\omega_{ННВ}} = \frac{1}{203,6 \cdot 10^{-7}} = 49116 \text{ час}.$$

Среднее время восстановления укрупненных элементов:

$$T_{B1} = T_{B2} = T_{B3} = T_{B4} =$$

$$= \frac{\omega_{36} T_{B36} + \omega_{н} T_{Bн} + \omega_{к} T_{Bк}}{\omega_{36} + \omega_{н} + \omega_{к}} =$$

$$= \frac{(0,1 \cdot 20 + 1,25 \cdot 60 + 0,08 \cdot 10) \cdot 10^{-4}}{(0,1 + 1,25 + 0,08) \cdot 10^{-4}} = 54,4 \text{ час}.$$

$$T_{B5} = T_{B6} = T_{B9} = T_{B3н} = 10 \text{ час};$$

$$T_{B7} = T_{B8} = T_{B3нк} = 20 \text{ час},$$

где: T_{B36} , $T_{Bн}$, $T_{Bк}$, $T_{B3н}$, $T_{B3нк}$ – среднее время восстановления задвижки на всасывающей линии, насосного агрегата, обратного клапана, задвижки на напорной линии, задвижки на напорном коллекторе [12].

Среднее время восстановления группы насосов нагретой воды:

$$T_B = \frac{\nu_5 T_{B5} + \nu_6 T_{B6} + \nu_7 T_{B7} + \nu_8 T_{B8} + \nu_9 T_{B9}}{\omega_{ННВ}} =$$

$$= \frac{(1,68 \cdot 10 + 1,68 \cdot 10 + 0,12 \cdot 20 + 0,12 \cdot 20 + \dots + 200 \cdot 10) \cdot 10^{-7}}{203,6 \cdot 10^{-7}} = 10,0 \text{ час}.$$

Параметр потока отказов укрупненных элементов группы насосов охлажденной воды:

$$\omega_l = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = \omega_{ci} + \omega_i + \omega_e =$$

$$= (0,1 + 1,25 + 0,08) \cdot 10^{-4} = 1,43 \cdot 10^{-4}, 1/\text{÷} \cdot \text{а} \cdot \text{н},$$

$$\omega_5 = \omega_6 = 2 \omega_{ci} = 2 \cdot 0,6 \cdot 10^{-4} = 1,2 \cdot 10^{-4}, 1/\text{÷} \cdot \text{а} \cdot \text{н},$$

$$\omega_7 = \omega_8 = 2 \omega_{ci} = 2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-4} = 0,2 \cdot 10^{-4}, 1/\text{÷} \cdot \text{а} \cdot \text{н}.$$

Вклады укрупненных элементов:

$$\nu_5 = \omega_5 (\hat{E}_{I_6} + \hat{E}_{I_8}) = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (1,2 \cdot 10^{-3} + 0,4 \cdot 10^{-3}) = 1,92 \cdot 10^{-7}, 1/\text{÷} \cdot \text{а} \cdot \text{н},$$

$$\hat{E}_{I_6} \cong \omega_6 \hat{O}_{A_6} = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot 10 = 1,2 \cdot 10^{-3},$$

$$\hat{E}_{I_8} \cong \omega_8 \hat{O}_{A_8} = 0,2 \cdot 10^{-4} \cdot 20 = 0,4 \cdot 10^{-3},$$

$$\nu_6 = \omega_6 \hat{E}_{I_5} = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} = 1,44 \cdot 10^{-7}, 1/\text{÷} \cdot \text{а} \cdot \text{н},$$

$$\nu_7 = \omega_7 = 0,2 \cdot 10^{-4}, 1/\text{÷} \cdot \text{а} \cdot \text{н},$$

$$\hat{E}_{I_5} \cong \omega_5 \hat{O}_{A_5} = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot 10 = 1,2 \cdot 10^{-3},$$

$$\nu_8 = \omega_8 \hat{E}_{I_5} = 0,2 \cdot 10^{-4} \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} = 2,4 \cdot 10^{-7}, 1/\text{÷} \cdot \text{а} \cdot \text{н}.$$

Параметр потока отказов группы насосов охлажденной воды.

$$\omega_{НОВ} = \nu_5 + \nu_6 + \nu_7 + \nu_8 =$$

$$= (1,92 + 1,44 + 200 + 2,4) \cdot 10^{-7} = 205,76 \cdot 10^{-7}, 1/\text{час}.$$

Наработка на отказ группы насосов охлажденной воды:

$$T = \frac{I}{\omega_{НОВ}} = \frac{1}{205,76 \cdot 10^{-7}} = 48600 \text{ час}.$$

Среднее время восстановления укрупненных элементов:

$$T_{B1} = T_{B2} = T_{B3} = T_{B4} =$$

$$= \frac{\omega_{36} T_{B36} + \omega_{н} T_{Bн} + \omega_{к} T_{Bк}}{\omega_{36} + \omega_{н} + \omega_{к}} =$$

$$= \frac{(0,1 \cdot 20 + 1,25 \cdot 60 + 0,08 \cdot 10) \cdot 10^{-4}}{(0,1 + 1,25 + 0,08) \cdot 10^{-4}} = 54,4 \text{ час};$$

$$T_{B5} = T_{B6} = T_{B3н} = 10 \text{ час};$$

$$T_{B7} = T_{B8} = T_{B3нк} = 20 \text{ час}.$$

Среднее время восстановления группы насосов охлажденной воды:

$$T_{ВНОВ} = \frac{\nu_5 T_{B5} + \nu_6 T_{B6} + \nu_7 T_{B7} + \nu_8 T_{B8}}{\omega_{НОВ}} =$$

$$= \frac{(1,92 \cdot 10 + 1,44 \cdot 10 + 200 \cdot 20 + 2,4 \cdot 20) \cdot 10^{-7}}{205,76 \cdot 10^{-7}} =$$

$$= 19,8 \text{ час}.$$

Параметр потока отказов ОСОВ на сталеплавильный цех (СПЦ):

$$\omega_{СПЦ} = \omega_c + \omega_{62} + \omega_{ННВ} + \omega_{НОВ} + \omega_{КНВ} + \omega_{КОВ} =$$

$$= (1,3 + 1,06 + 0,2036 + 0,20576 + 0,03 + 0,03) \cdot 10^{-4} =$$

$$= 2,38 \cdot 10^{-4} 1/\text{час},$$

где: $\omega_{КНВ}$, $\omega_{КОВ}$ – параметр потока отказов соответственно камеры нагретой воды и камеры охлажденной воды [10].

Наработка на отказ ОСОВ на СПЦ:

$$T = \frac{I}{\omega_{СПЦ}} = \frac{1}{2,38 \cdot 10^{-4}} = 4202 \text{ час} \approx 0,5 \text{ года}.$$

Среднее время восстановления работоспособности ОСОВ на СПЦ:

$$T_B = \frac{\omega_c T_{Bc} + \omega_{62} T_{B62} + \omega_{ННВ} T_{BННВ} + \dots}{\omega_c + \omega_{62} + \omega_{ННВ} + \dots} =$$

$$\frac{\dots + \omega_{НОВ} T_{BНОВ} + \omega_{КНВ} T_{BКНВ} + \omega_{КОВ} T_{BКОВ}}{\dots + \omega_{НОВ} + \omega_{КНВ} + \omega_{КОВ}} =$$

$$= \frac{(1,3 \cdot 9,8 + 1,06 \cdot 8 + 0,2036 \cdot 10 + 0,20576 \cdot 19,8 + \dots)}{(1,3 + 1,06 + 0,2036 + 0,20576 + \dots)} =$$

$$\frac{\dots + 2 \cdot 0,03 \cdot 25) \cdot 10^{-4}}{+ 2 \cdot 0,03) \cdot 10^{-4}} = 10,3 \text{ час.}$$

Коэффициент готовности ОСОВ на СПЦ:

$$K_G = \frac{T}{T + T_B} = \frac{4201,7}{4201,7 + 10,3} = 0,99755.$$

Коэффициент простоя ОСОВ на СПЦ:

$$K_{II} = I - K_G = 1 - 0,99755 = 0,00245.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Н.Н., 1982. Водоснабжение: [учебник]. – М.: Стройиздат. – 440 с.
2. Андоньев С.М., 1970. Испарительное охлаждение металлургических печей. – М.: Металлургия. – 424 с.
3. Вахлер Б.Л., 1977. Водоснабжение и водоотведение на металлургических предприятиях: Справочник. – М.: Металлургия. – 320 с.
4. Вахлер Б.Л., 1968. Оборудование насосных и воздушных станций металлургических заводов. – М.: Металлургия. – 276 с.
5. Водное хозяйство заводов черной металлургии., 1973 / Сериков Н.Ф., Красавцев Г.Н., Ильичев Ю.И. и др. – М.: Металлургия. – 405 с.
6. Водоподготовка промышленных предприятий., 1980 / Семенюк В.Д., Евстратов В.Н., Киевский М.И., Пазюра В.С., Копейка В.И.. – К.: Техніка. – 119 с.
7. Гладков В.А., Арефьев Ю.И., Пономаренко В.С., 1976. Вентиляторные градирни. – М.: Стройиздат. – 216 с.
8. Гончаров В.В., 1989. Брызгальные водоохладители ТЭС и АЭС. – Л.: Энергоатомиздат. – 140 с.
9. Игнатчик С.Ю. Расчет надежности, безопасности и инвестиционной эффективности сети водоотведения // Водоснабжение и санитарная техника. 2011. №12. С. 57-67
10. Ильин Ю.А., 1985. Надежность водопроводных сооружений и оборудования. – М.: Стройиздат. 240 с.
11. Кучеренко Д.И., Гладков В.А., 1980. Обратное водоснабжение: (Системы водяного охлаждения). – М.: Стройиздат. – 168 с.
12. Новохатний В.Г., 2012. Надійність функціонування подавально-розподільного комплексу систем водопостачання: автореф. дис. д-ра техн. наук. – К.: КНУБА. – 32 с.
13. Новохатний В., Костенко С. Надежность водоводов систем водоснабжения // Motrol. Commission of Motorization and energetic in agriculture. – 2013, Vol. 15, №6. – Lublin – Rzeszow. – p. 101 – 108.
14. Обработка воды на тепловых электростанциях. Под ред. чл.-кор. АН СССР В.А. Голубцова., 1966. – М.: Энергия. – 448 с.
15. Пономаренко В.С. Оценка надежности градирен // Водоснабжение и санитарная техника. – 1997. - №6. – С. 13 – 16.
16. Пособие по проектированию градирен (к СНиП 2.04.02-84), 1989. – М.: ЦИТП Госстроя СССР. – 190 с.
17. Смирнов А.Н., Сафонов В.М., Дорохова Л.В., Цупрун А.Ю., 2005. Металлургические мини-заводы. – Донецк: Донецкий нац. техн. ун-т. – 469 с.
18. Тебенихин Е.Ф., Гусев Б.Т., 1970. Обработка воды магнитным полем в теплоэнергетике. – М.: Энергия. – 144с.
19. Укрупненные нормы водопотребления и водоотведения для различных отраслей промышленности., 1978 / Совет Эконом. Взаимопомощи, ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР. – М.: Стройиздат. – 590 с.
20. Фарфоровский Б.С., Фарфоровский В.Б., 1972. Охладители циркуляционной воды тепловых электростанций. – Л.: Энергия. – 111 с.
21. Храменков С.В., 2005. Стратегия модернизации водопроводной сети. – М.: Стройиздат. 400 с.
22. Храпко С.А., 2007. Производство стали в ДСП (конспект лекций). – Донецк: Донецкий нац. техн. ун-т. – [электронный ресурс] // Режим доступа: <http://uas.su/books/2011/dps/dps.php>
23. Шабалин А.Ф., 1972. Обратное водоснабжение промышленных предприятий. – М.: Стройиздат. – 296 с.
24. Шабалин А.Ф., 1972. Эксплуатация промышленных водопроводов. – М.: Металлургия. – 499 с.
25. Шабалин А.Ф., 1968. Очистка и использование сточных вод на предприятиях черной металлургии. – М.: Металлургия. – 489 с.
26. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.laborant.ru/eltech/12/4/0/06-95.htm>

RELIABILITY OF COOLING CIRCULATING WATER SUPPLY SYSTEMS

Valeriy Novokhatniy, Sergey Kostenko

Summary. Developed method and gives examples of calculating the reliability of cooling circulating water supply systems for metallurgical example steelworks. The possibility of calculating the reliability of the water supply complex, which includes a circulating pump station, cooling towers, pressure and gravity water networks.

Key words: cooling circulating water supply systems, reliability.

ОПТИМИЗАЦИЯ СЕТЕЙ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДА

Александр Ткачук

Национальный университет водного хозяйства и природопользования
Адрес: Украина, г. Ровно, ул. Соборная, 11
E-mail: tkachuk_mbg@ukr.net

Аннотация. На основе результатов исследований работы городских систем подачи и распределения воды определены наиболее рациональные пути их усовершенствования с целью улучшения водоснабжения и энергосбережения.

Ключевые слова: водопроводные сети, насосные станции, системы подачи и распределения воды, потери воды, утечки воды, избыточные напоры.

ВВЕДЕНИЕ

Любая система водоснабжения города должна обеспечить качественной водой всех потребителей и, особенно, население. При этом ее работа должна быть надежной, экономичной и эффективной с точки зрения рационального использования воды, охраны окружающей среды и ряда других требований ее функционирования в городских условиях [1, 2, 3]. Эти требования в первую очередь относятся к наиболее стоимостной, масштабной и технологически сложной части системы водоснабжения города – комплексу гидравлически взаимодействующих сооружений в составе водопроводных сетей, насосных станций и напорно-регулирующих емкостей, составляющих систему подачи и распределения воды (СПРВ) [6, 12]. Как технологическая структура она характеризуется конструктивной сложностью, динамичностью состояния и несовершенством работы (даже для небольших объектов – это сотни километров водоводов и водопроводных сетей из труб разных материалов и диаметров, построенных в разные годы, несколько мощных главных насосных станций и подкачки, напорно-регулирующие сооружения, емкостью в десятки тысяч м.куб).

Имеющиеся недостатки в работе СПРВ вызваны не только неудовлетворительным состоянием сооружений (изношенность и аварийность сетей, утечки воды и др.), что имеет место в практике, но и несоответствием их параметров и конструктивных схем новым условиям функционирования. Это приводит к неудовлетворительному обеспечению водой потребителей, увеличению строительной стоимости СПРВ и эксплуатационных затрат на ее содержание, перерасходу электроэнергии на подачу воды и ее потерь через утечки.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Проведённые исследования [4..22] указывают, что функционирование СПРВ в нынешних условиях имеет свои характерные особенности, повязанные с перманентными изменениями их параметров,

требует детального анализа их тенденций и усовершенствования с целью стабилизации водоснабжения и ресурсосбережения.

Среди основных особенностей функционирования действующих СПРВ населенных пунктов Украины выявлены такие [6, 12]:

- *уменьшение объемов поданной воды* (обусловлено сокращением расходов воды промышленностью, внедрением водомерного учета и постоянным удорожанием электроэнергии, как основного энергоносителя);
- *увеличение неучтённых потерь воды* (утечек, нерационального водопотребления, как разницы между фактическими расходами и рассчитанными по нормам водопотребления, несанкционированных отборов воды);
- *увеличение аварийности трубопроводов и оборудования* в связи с их старением, низким уровнем планово-профилактического обслуживания, несвоевременными ремонтами и заменой (иногда практически полной ее отсутствием);
- *ухудшение гидравлических характеристик водоводов и водопроводных сетей* (рост гидравлических сопротивлений труб, неконструктивные изменения в схемах сетей, разборах воды из них и др.);
- *уменьшение общих, но увеличение удельных расходов электроэнергии*, в основном, в связи с изношенностью насосных агрегатов;
- *понижение показателей надежности* в связи со старением и изношенностью сооружений, трубопроводов и оборудования, низким уровнем их замены или восстановления.

В последние годы в Украине среднее удельное водопотребление составляет 320, а в отдельных городах – 173...422 л/сутки на человека. В странах Европы эти показатели намного ниже. На водопроводах городов Украины преобладают отборы воды населением и неучтенные расходы (утечки, нерациональное использование воды, технологические расходы). Из-за неудовлетворительного технического состояния и изношенности трубопроводов, доля неучтенных расходов воды в отдельных городах составляет свыше 80 %.

На подачу питьевой воды в СПРВ расходуется свыше 70 % электроэнергии, что потребляется всем водопроводно-канализационным хозяйством городов Украины. При этом средние удельные расходы электроэнергии на подачу воды составляют около 1,0 кВт-год/м³. Они превышают аналогичные показатели европейских государств в 1,8..2,6 раза. Стоимость электроэнергии составляет значительную часть прямых расходов в себестоимости воды (иногда до 70 %).

Статистические данные свидетельствуют, что вследствие неудовлетворительного технического состояния сетей и насосного оборудования нерациональные расходы электроэнергии составляют до 30% и более. Это связано с несовершенством СПРВ, неэффективной работой установленного насосного оборудования, значительными утечками и потерями воды (до 50%). Полностью амортизированы 30% насосных агрегатов, а 98% требуют замены. Основные причины перерасхода электроэнергии заключаются в следующем: значительные потери напора в водоводах и водопроводных сетях за счет увеличения гидравлических сопротивлений труб в связи с их коррозией и наличием дополнительных местных сопротивлений; неконструктивные схемы СПРВ, отсутствие или неэффективность зонирования и расположения напорно-регулирующих сооружений; неоптимальные режимы работы насосных агрегатов на сеть, особенно при введении графиков подачи воды, эксплуатация изношенного насосного оборудования с низкими КПД; увеличенные расходы воды, подаваемой в сеть, за счет утечек и нерационального ее использования потребителями и др.

Треть коммунальных водопроводных сетей (более 37 тыс. км) требует замены из-за интенсивного старения и изношенности трубопроводов. При этом потери воды в них из-за утечек составляют более 25%. Большинство водопроводных труб эксплуатируется более 30 лет, что негативно отражается не только на их гидравлических характеристиках, но и на показателях надежности. Установлено, что с увеличением срока эксплуатации аварийность труб, особенно стальных, возрастает из-за их коррозии. Так, на трубы, эксплуатируемые более 20 лет, приходится более половины всех отказов из-за аварий, ликвидация которых требует раскопок. В основном трубы (более 80%) имеют на внутренней поверхности отложения коррозионного характера, которые приводят к увеличению гидравлических сопротивлений труб в 1,5..5,0 и более раз. На степень увеличения сопротивлений труб, кроме их материала и химического состава воды, существенно влияют режимы подачи воды по трубопроводам и срок эксплуатации. При этом важным является местонахождение участка трубопровода в системе, скорость движения воды, характер их изменения во времени и т.п.

Одним из наиболее влиятельных факторов на аварийность сетей и величины утечек воды из них - есть напор воды [4, 6, 12, 17, 18, 21]. Поэтому во многих странах мира величины максимально допустимых напоров в водопроводных сетях нормируются. В частности, в Италии они составляют 61,2 м.вод.ст., в Великобритании, Ирландии - 30, в Нидерландах - 20. В Украине до недавнего времени было 60 м.вод.ст. [3], а с января 2014г. составляет 45 м.вод.ст. [1]. Соблюдение этих нормативных величин напоров значительно снижает аварийность трубопроводов, уменьшает утечки и нерациональные отборы воды.

В работе современных СПРВ наблюдается вторичное загрязнение воды при транспортировке ее по водопроводным трубам. Вследствие этого, качественно подготовленная питьевая вода на водопроводных очистных сооружениях после подачи в сеть не соответствует современным нормативным требованиям в местах ее разбора. Вторичное загрязнение связано с состоянием водопроводных сетей и режимами их работы. Среди основных факторов, влияющих на вторичное загрязнение воды - время пребывания воды в трубах, образование вакуума в них, коррозионные свойства воды, качество материала труб и др.

Такое состояние СПРВ указывает на необходимость их усовершенствования и полной реновации трубопроводов и оборудования. Важным есть изменение условий проектирования их реконструкции и модернизации с учетом существующих проблем и тенденций развития, изменение основных параметров в процессе эксплуатации, а также ресурсосбережения.

Для этого на действующих СПРВ проводят работы по диагностике, наладке и оптимизации их работы. Они проводятся комплексно, в определенной последовательности и предусматривают [10, 12]:

- *анализ СПРВ* (экспертная оценка информации о параметрах СПРВ и проверка на местах состояния насосных станций, РЧВ, водоводов, сетей и оборудования на них, анализ баланса подачи и потребления воды, выявления конструктивных недостатков в схеме и работе СПРВ и т.п.);
- *исследования СПРВ* (манометрическая съемка, определение фактических характеристик насосов и трубопроводов, выявление причин их изменений во времени, изучение режимов водопотребления);
- *моделирования СПРВ и ее расчет на ЭВМ* с целью определения наиболее рациональных путей совершенствования СПРВ, повышение надежности и экономичности ее работы;
- *наладка и (или) реконструкция СПРВ* (устранение выявленных "узких" мест, переоборудование насосных станций; поэтапная реконструкция СПРВ; санация и реновация трубопроводов и т.п.).

Работы по оптимизации СПРВ предусматривают определение наиболее целесообразного варианта усовершенствования ее схемы, параметров и режимов работы при нормативных технических ограничениях, в частности обеспечение всех потребителей водой при напорах, не превышающих допустимые, условий экономичности и надежности. Для этого проводится моделирование отдельных элементов СПРВ и режимов их совместной работы, а на их основе проводятся все расчеты, как при проектировании новых или реконструкции действующих СПРВ, так и оценке их эффективности в процессе эксплуатации. Основные вопросы моделирования и расчетов СПРВ можно отнести к трем группам [12]:

- *водопотребления* и формирования разбора воды из водопроводных сетей (установка расчетной нагрузки на систему);
- *гидравлические расчеты* отдельных элементов СПРВ и их совместной работы (так называемые «проверочные» расчеты);
- *технико-экономические расчеты* (установление схем СПРВ, диаметров трубопроводов, размеров сооружений и т.п.).

Оценку режимов водопотребления, как случайных процессов, осуществляют на основании двух основных методов - вероятностном и статистическом. Однако, имеющиеся в нормативах требования [1, 3] не позволяют достоверно оценить нагрузку на систему для различных уровней обеспеченности, что важно как для системы в целом, так и для отдельных ее элементов. Кроме того, уровни обеспеченности вообще не нормируются.

Гидравлические расчеты водопроводных сетей проводят с 30-х годов прошлого века. Современная компьютерная техника позволяет эффективно проводить высокопроизводительные гидравлические расчеты совместной работы водопроводных сетей и взаимодействующих с ними сооружений, входящих в состав систем подачи и распределения воды, с максимальным учетом их особенностей и сервиса для пользователей. Программы для ЭВМ ориентированы на ГИС-технологии, что создает условия для качественного и быстрого формирования исходных данных путем импорта файлов с других ГИС-моделей. Это программные комплексы WaterCAD® 6.0 компании Haestad Methods, EPANET Льюиса А. Росмана, ZuluHydro ООО «Политерм» и др. [12].

Наряду с весомыми положительными сторонами, эти компьютерные программы не учитывают изменения величин отборов воды от напоров в узлах, имеют трудности определения изменений гидравлических сопротивлений во времени. При их использовании возникают проблемы с точностью оптимизационных расчётов из-за отсутствия надлежащего математического аппарата и моделирования изменений влиятельных параметров в процессе эксплуатации.

Технико-экономические расчеты, в ходе которых определяют экономически выгодные параметры сооружений водопроводных сетей, обычно проводят без достаточного учета взаимовлияния других сооружений СПРВ и показателей их надежности. Но наибольшим недостатком существующих методов является то, что они не учитывают изменения параметров сооружений и трубопроводов в процессе эксплуатации, стохастический характер влияющих факторов на режимы работы, взаимосвязей между рабочими параметрами отдельных элементов СПРВ.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Оптимизация сетей водоснабжения города требует учета многих факторов, определяющих их состояние, взаимосвязь с другими влияющими сооружениями СПРВ и должна базироваться на современном математическом аппарате, позволяющем моделировать большое количество элементов и режимов работы СПРВ. Используемые с целью оптимизации существующие методы расчетов СПРВ не учитывают изменения влиятельных параметров в процессе эксплуатации, зависимость отборов воды от напоров. Кроме того, отсутствуют методики определения расчетных расходов воды в зависимости от заданных уровней обеспеченности и категорий СПРВ; расчеты экономически выгодных диаметров трубопроводов и определения конструктивных схем СПРВ проводят без учета их показателей надежности и стохастических изменений в режимах их работы.

Настоящим исследованием предусмотрено определение наиболее эффективных путей решения указанных вопросов и обоснование возможности применения полученных ранее результатов при проведении оптимизации сетей водоснабжения города.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Критерием оптимизации водопроводной сети города с целью определения наиболее целесообразного варианта ее усовершенствования при соответствии параметров сети нормированным техническим ограничениям и условиям надежности может выступать дисконтированная величина суммарных финансовых расходов на строительство и содержание сети и взаимодействующих с ней сооружений, то есть всей СПРВ [12]:

$$B_u = \sum_{t=0}^T \frac{K_t + B_{\text{эспл } t}}{(1+e)^t} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где: K_t – стоимость строительных работ в t -й год; $B_{\text{эспл } t}$ – эксплуатационные расходы в t -й год; T – срок реализации проекта, год; e – коэффициент дисконтирования.

Поиск оптимальных параметров сети или ее схемы сводится к нахождению минимальных величин B_n дисконтированных к началу реализации проекта. Для этого производится сравнение нескольких технически равнозначных вариантов или нахождение экстремума функции цели. В первом случае, например, при рассмотрении схем сети, определяются численные значения B_n для разных вариантов. Во втором – все величины, входящие в формулу (1) рассматриваются как математические зависимости, и производится исследование общего их выражения (функции цели) на экстремум. На основании этого способа определены аналитические выражения для нахождения экономически выгодных диаметров труб сети, параметров насосных станций, питающих водопроводную сеть, станций подкачки и др.

Для определения экономически выгодных диаметров труб сети и водоводов получена формула:

$$d_{ек} = E \cdot k_{qt} \cdot Q_{cp.нс.о}^{\frac{\beta+1}{\alpha+m}}, \quad (2)$$

где: E – параметр, учитывающий показатели стоимости строительства и эксплуатации трубопровода (экономический фактор); для условий Украины можно принимать равными: $E = 0,8 \dots 1,1$; k_{qt} – обобщенный коэффициент относительной загрузки участка сети; $Q_{cp.нс.о}$ – средняя (за год) подача воды в сеть в начальный период, м³/с; α , β , m – показатели степени, зависящие от материала труб, приведенные в табл. 1.

Таблица 1. Значения коэффициентов и показателей степеней для труб из разных материалов [12]

Table 1. Values of the coefficients and exponents for pipes of different materials

Трубы	k	β	m	α
Стальные	0,00148	1,93	5,08	1,1/1,15
Чугунные	0,00163	1,81	4,90	1,6/1,5
Железобетонные	0,00169	1,85	4,89	2,05/2,4
Пластмассовые	0,00105	1,774	4,774	1,8/1,5

Примечания: 1. Коэффициенты k принимают для q , м³/с, и d , м; 2. Над чертой приведены величины параметра α для водоводов, а под чертой – для водопроводных сетей.

Обобщенный коэффициент относительной загрузки участка k_{qt} определяют по формуле:

$$k_{qt} = \left(\frac{k_D^\beta}{n} \right)^{\frac{1}{\alpha+m}} \cdot k'_{qt}, \quad (3)$$

где: k_D – коэффициент загрузки участка, определяемый как отношение суммы расходов воды на участке до подачи насосной станцией для расчетного случая на среднее водопотребление в начальный период;

n – количество ниток трубопроводов в сечении сети с данным участком;

k'_{qt} – множитель, учитывающий изменение влиятельных параметров, который рассчитывают по формуле:

$$k'_{qt} = k_{q\sigma} \cdot k_{q\eta} \cdot k_{qt} \cdot k_{qK}^2 \cdot k_{qe} \cdot k_{qT}, \quad (4)$$

где: $k_{q\sigma}$, $k_{q\eta}$, k_{qt} , k_{qK} , k_{qe} и k_{qT} – коэффициенты, учитывающие изменение стоимости электроэнергии, коэффициентов полезного действия насосных агрегатов, размеров водопотребления, неравномерности подачи воды, коэффициента дисконтирования и сроков реализации проектов, которые определяют по эмпирическим формулам и номограммами [12, с. 100...104].

Указанные коэффициенты определяются как соотношение расчетных величин параметров к предварительно заданным (k_{qK} , k_{qe} и k_{qT}) или по формулам ($k_{q\sigma}$, $k_{q\eta}$ и k_{qt})

$$k_q = 1 + a \cdot t, \quad (5)$$

где: a – коэффициент изменения за год стоимости электроэнергии, коэффициентов полезного действия насосов или размеров водопотребления, 1/год; t – срок эксплуатации, годы.

Для вычисления коэффициентов увеличения гидравлических сопротивлений труб получена формула [6, 10, 12]:

$$K_S = 1 + a_2 \cdot \left(1 + \frac{0,02554}{d_p} \right) \cdot \lg(1 + a_1 \cdot t), \quad (6)$$

где: a_1 – параметр, учитывающий непрерывность работы трубопровода в «основном режиме», 1/год; a_2 – коэффициент, учитывающий влияние основных факторов на рост гидравлических сопротивлений; d_p – расчетная величина внутреннего диаметра трубы (равна диаметру новых труб $d_p = d$), м.

Для удобства пользования созданы компьютерные программы (*UWM*, *GRS*, *PWS* и др.) и программные модули в среде *Microsoft Excel* (*TEP_dek.xls*, *kfQ.xls*, *Пог_vump.xls* и др.) [6, 12], позволяющие автоматизировать указанные расчеты.

Для моделирования водопотребления на действующих водопроводных сетях получена аналитическая функция интегрального распределения расходов воды, которая устанавливает адекватную зависимость вероятности водоразбора P от коэффициентов его неравномерности K с учетом наиболее характерных местных факторов в режимах подачи и разбора воды:

$$P = \frac{e^{\alpha \cdot (K-a)} + c}{e^{\alpha \cdot (K-a)} + e^{b/K}}, \quad (7)$$

где: α, a, b и c – параметры, зависящие от дисперсии σ^2 функции плотности распределения расходов воды, вида ее интегральной кривой, ее смещения (асимметрии) и определяются путем аппроксимации статистических данных (рис. 1).

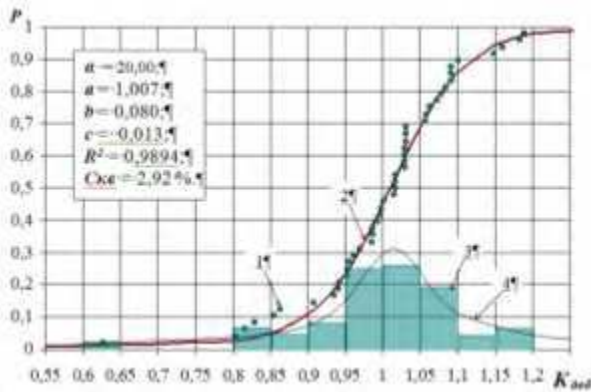


Рис. 1. Характерный график интегрального распределения коэффициентов суточной неравномерности водопотребления:

- 1 - экспериментальные;
- 2 - аналитическая функция распределения (по формуле 7);
- 3 - экспериментальная зависимость функции плотности распределения;
- 4 - то же, теоретическая

Fig. 1. Characteristic graph of the cumulative distribution coefficients of daily water consumption of non-uniformity

Для практического применения предложен метод статистического анализа водоразбора в диапазоне расчетных величин его обеспеченности $P_o = 0,95..0,999$ с вычислением максимальных коэффициентов неравномерности водопотребления по формуле:

$$K_{max} = 1 + \frac{1}{\alpha} \cdot \ln\left(\frac{1 - P_o}{P_o}\right), \quad (8)$$

где: α – показатель в формуле 7, который определяется по статистическим данным водопотребления.

На основе оценки влияния потоков аварийности и технического состояния водопроводных сетей на надежность СПРВ в целом и соответствия их конструктивных схем заданным уровням обеспеченности потребителей водой определены числовые значения коэффициентов готовности и уровней обеспеченности (табл. 2).

Таблица 2. Предлагаемые к нормативам величины времени снижения подачи воды $T_{зн}$, коэффициентов готовности $K_{z.p}$ и уровней обеспеченности P_o

Table 2. Proposed regulations to reduce the amount of the time water supply, the coefficients of preparedness and security levels

Категория	Время снижения подачи воды				Уровни обеспеченности P_o для расходов воды	
	до 30 %		на 30..100%		суточных	часовых
	$T_{зн(30)}$, сутки	$K_{z.p}$	$T_{зн(>30)}$, час	$K_{z.p}$		
1	3	0,90	6	0,99	0,01	0,005

2	10	0,75	12	0,98	0,03	0,01
3	15	0,60	24	0,97	0,04	0,015

Для учета увеличения расходов воды от величин свободных напоров за счет утечек воды и непроизводительных расходов воды получены аналитические зависимости:

$$q_{общ} = q_n \cdot k = q_n \cdot \left(\frac{H}{H_n}\right)^\chi, \quad (9)$$

где: q_n – суммарный расход воды при напоре равном нормированному $H=H_n$; H – свободный напор в сети, м; χ – показатель степени, который зависит от технического состояния трубопроводов, водоразборной арматуры и местных условий водоразбора из сети.

Показатель степени χ определяет характер изменений расходов от напоров в сети, находится в диапазоне $\chi = 0,5..2,6$ и определяется на основании натурных исследований. Предварительно показатель степени χ при напорах больше нормативных $H>H_n$ определяется по формуле:

$$\chi = 0,95 \cdot K_m^{0,65}, \quad (10)$$

где: K_m – коэффициент регрессии, который зависят от условий разбора воды, общих утечек воды и ее потерь у потребителя, и может определяется по формуле:

$$K_m = 6,36 \cdot \alpha \cdot \gamma + 0,26, \quad (11)$$

где: α и γ – коэффициенты, которые учитывают соответственно соотношение суммарных утечек к общему разбору воды и ее потерь в зданиях (у потребителей) к суммарным утечкам.

Коэффициент K_m равняется нулю для зависимостей, которые не учитывают увеличения расходов воды при росте напоров воды, и при α от 0 до 1 находятся в пределах 0,26...6,62.

Значения коэффициентов α та γ теоретически находятся в пределах 0 до 1. В реальных условиях эксплуатации СПРВ их величины варьируются: α – от 0,1 до 0,9; γ – от 0,4 до 0,8. Для оценки утечек только в жилых зданиях значения γ следует принимать равным 1, а в случае утечек только из внешних водопроводных сетей $\gamma = 0$.

Проведенный на основе полученных результатов исследований анализ позволил определить основные положения экономической целесообразности устройства СПРВ с использованием наиболее распространенных их схем. В частности установлено, что при обосновании схем водоводов и водопроводных сетей в СПРВ всегда целесообразно устраивать основную часть водопроводных линий с минимально допустимыми диаметрами, а наиболее важные магистрали - с увеличенными экономически обоснованными минимальной длины. Наиболее экономичным является тот вариант, в котором

соотношение между диаметрами водопроводных линий, проложенных в одном направлении, больше отличаются от единичного значения. Это дает подоплеку для устройства СПРВ нового типа - с районированием водопроводных сетей [6, 12]. При определении схем питания СПРВ в первую очередь следует учитывать нормативные требования и технические ограничения, а оптимизационные расчеты имеют место только при технической равнозначности возможных вариантов подачи воды с наиболее полным учетом влиятельных факторов и местных условий (планы сетей, расположение водопотребителей, рельеф и др.).

Такие подходы к оптимизации действующих водопроводных сетей позволяют в каждом районе сети поддерживать свободные напоры максимально приближенными к требуемым. В результате достигается минимизация избыточных свободных напоров и, как следствие, снижение потерь воды из-за утечек, снижение аварийности сети и уменьшение расхода электроэнергии на подъем воды.

Целесообразность применения результатов проведенных исследований, подтверждается данными анализа функционирования действующих СПРВ (более 30 городов) с изменениями их схем районированием [4..14]. Такие СПРВ являются ресурсосберегающими, имеют высокие уровни надежности и водообеспечения потребителей. Применение предложенных методов при реконструкции и интенсификации работы СПРВ позволяет стабилизировать водоснабжения, снизить затраты электроэнергии и потери воды, что подтверждено расчетами и реальными результатами на действующих СПРВ.

На основании многолетних исследований работы системы водоснабжения г. Ровно предложено разделение водопроводной сети на зоны и районы. Этой схемой определены четыре основные зоны (рис. 2), которые питаются отдельными водопроводными насосными станциями, и три района с подключением сетей через регуляторы давления.



Рис. 2. Схема зонирования водопроводной сети г. Ровно
Fig. 2. Zoning scheme water mains Rivne

Предусмотрено, что напоры в водопроводных сетях каждой зоны и района должны быть

максимально приближены к необходимым при различных режимах водопотребления. Поэтому, предложено проводить регулирования напоров на выходе из насосных станций в зависимости от напоров в контрольных точках водопроводных сетей каждой зоны. С целью максимального приближения напоров к необходимым в пределах всей сети каждой зоны для групп высоких домов выделено районы сети, в которые подача воды осуществляется насосными станциями подкачки.

Изменения в технологии подачи воды потребителям города предусматривали восстановление круглосуточной подачи воды, регулирование напоров в сети, реновацию изношенного насосного оборудования. Для уменьшения потерь воды из-за утечек из изношенных трубопроводов водопроводной сети, проводится их санация (цементирование внутренней поверхности труб, введение полиэтиленовых труб внутрь изношенных металлических) и замена, в частности, пластмассовыми трубами. Кроме того, проводится значительная работа по рационализации водопотребления в жилом секторе (установка домовых и квартирных водомеров, их бесплатные проверки, замены внутренних домовых сетей и водоразборных приборов, пропаганда культуры водопотребления в СМИ и др.).

Внедрение этих мероприятий на Ивано-Франковском водопроводе (рис. 3) позволило стабилизировать водоснабжение города, значительно расширив границы графиков подачи воды, а для отдельных районов - круглосуточно. Стабилизированы объемы реализации воды, уменьшены ее потери из-за утечек, общие и удельные расходы электроэнергии, которые сократились на 24% по сравнению с периодом до внедрения оптимизационных мероприятий.



электроэнергии и потери воды, что подтверждено расчетами и реальными результатами на действующих СПРВ.

ЛИТЕРАТУРА

- ДБН В.2.5-74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. К.: Мінрегіонбуд, 2013. – 172.
- Методичні рекомендації з розроблення схем оптимізації роботи систем централізованого водопостачання і водовідведення. Затв. наказом МЖКГ України 23.12.2010 № 476. м.Київ. - 9.
- СНиП 2.04. 02 - 84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. - М.: Стройиздат, 1985. - 136.
- Ткачук А., Новицкая О., 2009. Гидравлические расчеты водопроводных сетей систем подачи и распределения воды // «Вода Magazine», № 10 (26). М. – 50 – 53.
- Ткачук О., 2008. Гідралічні розрахунки діючих водопровідних труб // «Водопостачання і водовідведення». Виробничо-практичний журнал. № 2. К. – 2 – 6.
- Ткачук О., Косінов В., Новицька О., 2011. Системи подачі та розподілення води населених пунктів. – Рівне: НУВГП. - 273.
- Ткачук О., Орлов В., Ткачук А. Оцінка впливу потоків аварійності на надійність систем подачі і розподілення води // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Зб. наук. пр. Вип. 1 (37). Рівне: НУВГП. -189 – 195.
- Ткачук О., 2008. Особливості моніторингу міських інженерних мереж // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Зб. наук. пр. Вип. 3 (43). Рівне: НУВГП. – 228 – 233.
- Ткачук О., 2009. Рекомендації з визначення економічно вигідних діаметрів трубопроводів водопровідних систем // «Водопостачання і водовідведення». Виробничо-практичний журнал. № 1. К.-2 – 6.
- Ткачук О., 2007. Структурно-функціональне удосконалення систем подачі та розподілення води. Автореф. дис. ... докт. техн. наук. Рівне: НУВГП. 32.
- Ткачук О., Ткачук А., 2012. Оптимізація роботи системи подачі та розподілення води м. Хмельницький // Науковий вісник будівництва. Вип. 69. Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – 338 – 342.
- Ткачук О., 2008. Удосконалення систем подачі та розподілення води населених пунктів. Монографія. Рівне: НУВГП. – 301.
- Ткачук О., Хомко В., 2008. Оцінка ефективності регулювання напорів у водопровідній мережі м. Рівного // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Зб. наук. пр. Вип. 2 (42). Рівне: НУВГП. -346 – 353.
- Ткачук О., 2004. Шляхи забезпечення функціонування систем подачі і розподілу води в умовах їх старіння й зношення. // Науковий вісник будівництва. Вип. 26. Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. –69 – 74.
- David Inman & Paul Jeffrey: A review of residential water conservation tool performance and influences on implementation effectiveness, Urban Water Journal, 2006, 3:3, 127-143
- Dohnalik P., Jedrzejewski Z. Efektywna eksploatacja wodociagow. Ograniczanie strat wody. – Krakow: LEMTECH, 2004. – 285 p.
- Emanoil Barsan, Calin Ignat, Romania. Development of existed water supply networks. // Water management and hydraulic engineering: Proceeding of the VII International symposium on water management and hydraulic engineering. Poland, 10-12.09.2001 / Technical University of Gdansk. Faculty of hydro and environmental engineering., 2001, Gdansk, - p. 397-404.
- Novytska Olha. Determination of per capital water demand rates of a community // Collected articles of young scientists “Innovative technologies in water management complex” – NUWMNRU, Issue 2. – Rivne, 2012. – P. 150-152.
- H. Motiee , E. McBean & A. Motiei (2007): Estimating physical unaccounted for water (UFW) in distribution networks using simulation models and GIS, Urban Water Journal, Urban Water Journal, Vol. 4, No. 1, March 2007, 4:1, 43-52
- R. Puusta, Z. Kapelanb, D.A. Savicb and T. Koppel. A review of methods for leakage management in pipe networks // Urban Water Journal, February 2010. – Vol. 7, Issue 1. – P.25–45
- Zbigniew Siwon. Problemy modelowania i eksploatacji systemow dystrybucji Wody // IV Miedzynarodowa konferencji “Zaopartzenie w wode, jakosc i ochrona wod”. – Krakow, 11 – 13 wrzesnia 2000. – P.735–754.
- Zivko Veljanoski, Petko Pelivanoski. Lessening the leakage of water by reduction the pressure in the water supply systems // Water management and hydraulic engineering: Proceeding of the VII International symposium on water management and hydraulic engineering. Poland, 10-12.09.2001 / Technical University of Gdansk. Faculty of hydro and environmental engineering. – Gdansk, 2001. – P.391–396.

OPTIMIZATION OF WATER SUPPLY CITY

Summary. Based on research robots urban systems water supply and distribution determine the most efficient ways to improve them in order to improve water and energy efficiency.

Key words: water mains, pumping stations, supply and distribution system water, water loss, water leaks, excessive head.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА АЭРАЦИИ СТОЧНЫХ ВОД В ЗАКРЫТЫХ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ОКИСЛИТЕЛЬНЫХ КАНАЛАХ

Степан Эпоян, Ирина Штонда¹, Юрий Штонда².

¹Харьковский национальный университет строительства и архитектуры
Украина, 61002, г. Харьков, ул. Сумская, 40
vkg.knuca@ukr.net
shtonda@i.ua

²ООО «Водный проект КРЫМ», г. Симферополь, АР Крым
Украина 95004, АР Крым, г. Симферополь, ул. К. Маркса, 40
shtonda-yurij@yandex.ru

Аннотация. Приведены результаты исследований по интенсификации процесса аэрации сточных вод для повышения эффективности биологической очистки в закрытых циркуляционных окислительных каналах.

Ключевые слова: канализационные очистные сооружения, сточная вода, аэрация, биологическая очистка, закрытые циркуляционные окислительные каналы.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности работы биологической очистки сточных вод на канализационных очистных сооружениях чрезвычайно важно в настоящее время.

В существующих экономических и экологических условиях состояние централизованных систем водоотведения и очистных сооружений в населенных пунктах Украины находится в аварийном состоянии, что может привести к необратимым деградационным процессам окружающей среды [2, 11, 26].

В данный момент имеются системы водоотведения, которые эксплуатируются без капитального ремонта уже в течение последних 20 - 55 лет и, как следствие, более 75% канализационных сетей находятся в запущенном состоянии, а очистные сооружения нуждаются в реконструкции модернизации технологического процесса и оборудования [4, 7, 13].

Большое количество очистных сооружений остановлено и выведено из эксплуатации. Сточные воды, которые должны быть очищены и обезврежены на этих объектах, попадают в окружающую среду совершенно неочищенными, что представляет потенциальную техногенную угрозу для окружающей среды и соответственно, здоровью и жизни людей [1, 13, 17].

Качество очистки сточных вод на существующих сооружениях не соответствует установленным нормативам по причине применения устаревших технологий, которые применялись в 70 - х годах прошлого века [6]. В результате уменьшения потребления воды населением и предприятиями, увеличилось концентрации загрязняющих веществ в сточных водах (азотная группа, фосфаты, органические вещества, СПАВ и т.д.), повышенные концентрации которых не учитывались ранее при разработке технологии очистки и проектировании существующих очистных сооружений канализации [2, 5, 20].

Для повышения эффективности очистки сточных вод при реконструкции существующих и проектировании новых очистных сооружений необходимо внедрять современное оборудование и новые методы в технологии очистки городских сточных вод.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Для полной биологической очистки хозяйственно-бытовых и близких к ним по составу производственных сточных вод эксплуатируются на канализационных очистных сооружениях циркуляционные окислительные каналы. Данные сооружения обеспечивают биохимическое окисление загрязняющих веществ и минерализацию ила, при этом не требуется первичного отстаивания сточных вод, что значительно упрощает технологическую схему очистной установки [2, 3, 8, 9, 11].

Впервые циркуляционные окислительные каналы появились в Голландии и представляли собой замкнутую в плане траншею с трапециевидным поперечным сечением, в которой установлен аэратор щеточного типа с горизонтальной осью вращения. Окислительные траншеи работали в периодическом режиме [6, 9, 12].

Циркуляционный окислительный канал в основном имеет замкнутую форму в плане и оборудован механическими аэраторами, с помощью которых сточные воды насыщаются кислородом и приводится в движение для быстрого перемещения и поддержания активного ила во взвешенном состоянии. В канале осуществляются биологические процессы очистки сточных вод с помощью активного ила, находящегося в режиме полного окисления.

Основными технологическими параметрами, определяющими эффективность работы циркуляционных окислительных каналов, являются нагрузки на ил, концентрации активного ила, и,

соответственно, нагрузка на объем циркуляционных окислительных каналов, баланс кислорода, прирост и качество избыточного ила, баланс биогенных элементов и расход электроэнергии.

Выполненный анализ существующего положения очистки городских и поселковых сточных вод в циркуляционных окислительных каналах показал, что, несмотря на наличие технологических методов, схем и сооружений, до сих пор полностью не решены вопросы по перемешиванию и насыщению сточных вод кислородом для эффективной биологической очистки в закрытых циркуляционных окислительных каналах. Такие системы характерны для центральных и северных областей Украины, где вопросы, связанные с экологической безопасностью бассейна малых и больших рек Украины чрезвычайно актуальны.

Основными причинами неэффективно работающих канализационных очистных сооружений, являются:

- неэффективная эксплуатация сооружений механической очистки;
- неудовлетворительная эксплуатация и функционирование циркуляционных окислительных каналов;
- отсутствие в существующих схемах эксплуатации сооружений эффективного возврата циркуляционного активного ила после вторичных вертикальных отстойников в циркуляционные окислительные каналы.

Аэрация сточных вод в закрытых циркуляционных окислительных каналах осуществляется при помощи механической и пневматической аэрации. Механическая аэрация сточных вод, применяемая в закрытых циркуляционных окислительных каналах, осуществляется при помощи роторных механических аэраторов [6, 8, 9]. Механические аэраторы, применяемые в закрытых циркуляционных окислительных каналах, могут быть следующих типов: поверхностные турбинные аэраторы, всасывающие турбинные аэраторы и щеточные аэраторы.

Поверхностные турбинные аэраторы МП 7,5-1,25, IАРН, IАРП и ТА представляют собой агрегаты, состоящие из собственно аэратора (центробежного ротора), электродвигателя и редуктора. При вращении ротора расположенные на нем лопасти отбрасывают воду к периферии, в результате чего образуется кольцевой гидравлический прыжок и происходит интенсивный перенос кислорода воздуха в воду. Одновременно снизу к ротору подсасывается жидкость, благодаря чему обеспечивается хорошее ее перемешивание и распределение обогащенных кислородом слоев во всем объеме резервуара [6, 9].

Всасывающие турбинные аэраторы МВ 22-0,9 и АИ-1м состоят из двигателя, вала, ротора, направляющей трубы и воздухозаборника. Принцип

действия аэраторов с всасыванием атмосферного воздуха основан на том, что заглубленный ротор прокачивает сточную воду через трубу с воздухозаборными отверстиями, расположенными на уровне сточной воды в закрытых циркуляционных окислительных каналах. При этом поток сточной воды вовлекает через отверстия воздух, который, проходя через ротор, интенсивно диспергируется. Водовоздушная смесь выбрасывается в нижней части закрытого циркуляционного окислительного канала и смешивается со всем объемом сточной воды и активного ила, что обеспечивает хорошую аэрацию. Турбинные аэраторы устанавливаются на площадке, опирающейся на стены закрытого циркуляционного окислительного канала.

Щеточные аэраторы представляют собой горизонтальный вал с перпендикулярно укрепленными лопатками. Типы щеточных аэраторов различаются профилями лопаток. В основном лопатки изготовляют из уголков, реже из металлоконструкций по профилю похожие на лопатку весла. При работе щеточных аэраторов происходит перемешивание смеси сточной воды и активного ила, разбрызгивание ее капель, захват воздуха из атмосферы и интенсивное перемешивание воздуха со смесью сточной воды и активного ила [8, 9].

Система пневматической аэрации сточных вод состоит из следующих элементов:

- источник образования сжатого воздуха, это может быть воздуходувка, газодувка или компрессор;
- система напорных трубопроводов для подачи сжатого воздуха к аэрационным элементам;
- аэрационные элементы.

Так как перемешивание и аэрация, как правило, занимают от 60 до 80% общего потребления электроэнергии в закрытых циркуляционных окислительных каналах, то из экономических и экологических соображений имеет смысл уменьшить потребление электроэнергии путем применения современного оборудования и тем самым повысить эффективность.

Существует большое количество типов и видов аэрационных элементов, каждый из них, имеет свои преимущества и недостатки. Для аэрации сточных вод в закрытых циркуляционных окислительных каналах, наиболее приемлемыми по техническим характеристикам для применения, рассматриваются дисковые мембранные и трубчатые аэраторы [2, 11, 26].

Дисковые мембранные аэраторы отличаются прочной и усовершенствованной конструкцией для оптимальной подачи воздуха. Аэраторы отличаются оптимизированной перфорацией мембраны и гибким, а также экономичным диапазоном регулирования для наилучшего использования кислорода. Равномерная мелкопузырчатая аэрация сточных вод осуществляется через всю поверхность

мембраны. Корпус дисковых мембранных аэраторов состоит из встроенной подложкой мембраны, обратного клапана и крепления.

Увеличение обмена кислорода, при использовании дисковых мембранных аэраторов в закрытых циркуляционных окислительных каналах, требует использование комбинации системы аэрации и погрузной мешалки.

Наиболее часто в технологии очистки коммунальных и промышленных сточных вод применяются аэрационные трубчатые мембраны. Аэрационные трубчатые мембраны используются также для перемешивания гальванических ванн, в качестве аэрационных установок при разведении рыбы, как наружных, так и внутренних, а также для пневматической флотации – сепарации физических и химически различных веществ. К бесспорным преимуществам аэрационных трубчатых мембран относится длительный срок службы (до 12 лет), высокая химическая и механическая устойчивость. Аэрационные трубчатые мембраны изготавливаются из полиуретанового эластомера с постоянной эластичностью, устойчивого к гидролизу, воздействию микроорганизмов и ряду химических соединений. Длина отдельной «аэрационной системы» может быть до 30 м, причем это не влияет на равномерность образования воздушных пузырьков по всей длине [1, 2, 6, 11, 17, 26].

Основные преимущества:

- равномерное и постоянное образование пузырьков по всей длине аэрационного элемента даже у очень длинных элементов (до 30 м);

- не происходит обратного проникновения жидкости и забивки мембраны при прерывании эксплуатации;

- минимальные потери давления (3-5 кПа, в зависимости от расхода и возраста системы);

- большой перенос кислорода;
- оптимизированная форма и размер перфорации;

- высокая прочность;
- оптимальная толщина стенки, обеспечивающая высокую механическую прочность;

- отличная химическая устойчивость;

- длительный срок службы;

- мембрана позволяет осуществлять автоматический отвод конденсата из аэрационной системы.

Для обеспечения кислородного режима в закрытых циркуляционных окислительных каналах активного ила также применяют мелкопузырчатые трубчатые полипропиленовые аэраторы.

Диаметр пузырьков, формирующихся наружным диспергирующим слоем трубчатых полипропиленовых аэраторов, 2 – 3 мм. Это обуславливает высокие массообменные характеристики и достаточное перемешивание иловой смеси. Благодаря воздушному зазору между каркасом и диспергатором, происходит разделение функций равномерного распределения воздуха по длине плети и его диспергации, что обеспечивает значительное снижение потери напора в аэраторе.

Конструктивно трубчатые полипропиленовые аэраторы (рис. 1) представляют собой волокнисто-пористую трубу (рис. 1 поз. 1), внутри которой размещена перфорированная поливинилхлоридная труба (рис. 1 поз. 2) меньшего диаметра с образованием воздушного зазора между ними (рис. 1 поз. 3). На торцах аэраторов предусмотрены присоединительные полиэтиленовые муфты (рис. 1 поз. 4) с внутренней и наружной резьбой.

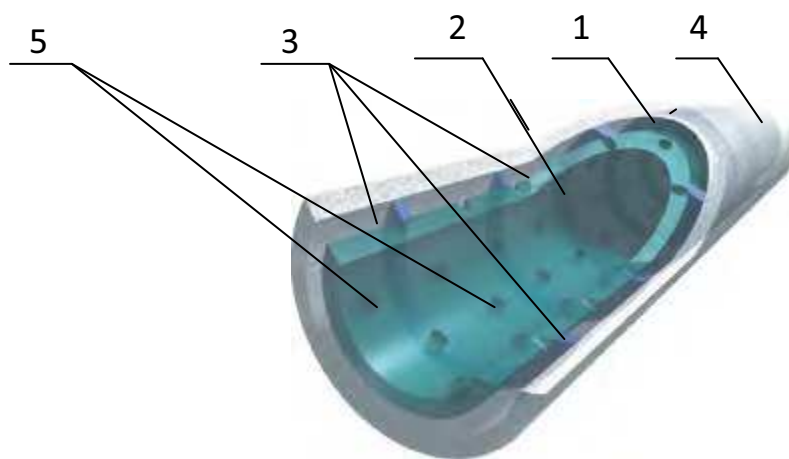


Рис. 1 Конструкция каркасного трубчатого полипропиленового аэратора

1 - волокнисто-пористая труба, 2 - перфорированная труба, 3 - воздушный зазор, 4 - полиэтиленовая муфта, 5 - перфорация трубы

Fig. 1 Construction of framework tubular polypropylene aerator

1 - fibred-porous pipe, 2 - perforated pipe, 3 - air-gap, 4 - polyethylene muff, 5 - perforation of pipe

Трубчатый диспергатор воздуха (волокнуто-пористая труба) изготавливается из полиэтилена высокого давления методом пневмоэкструзии, сущность которого заключается в нанесении волокон из расплавленной массы полиэтилена на формообразователь под давлением воздуха.

Перфорация (рис. 1 поз. 5) поливинилхлоридной (полиэтиленовой) трубы выполняется для пропуска воздуха путем сверления или пропила заданной расчетной общей площади.

Подаваемый в систему сжатый воздух проходит внутри каркасной трубы и с помощью радиальных отверстий и воздушной прослойки равномерно распределяется через диспергирующую поверхность аэратора в обрабатываемую жидкость, образуя мелкие пузырьки.

Такая конструкция аэраторов позволяет обеспечить равномерное распределение воздуха в аэрируемой жидкости и добиться максимальной эффективности аэрации.

Общая площадь перфорации внутренней трубы является оптимальным для распределения всего объема подаваемого воздуха. Перфорация обеспечивает равномерный выход и распределение воздуха в воздушных зазорах между перфорированной трубой и диспергирующим слоем аэратора. Наличие воздушных зазоров аэратора позволяет распределить поток воздуха по всей длине аэрационного луча.

Проходя через диспергатор, воздушный поток дробится на мелкие пузырьки, что способствует насыщению жидкости кислородом и эффективному использованию всего объема подаваемого воздуха.

Таким образом, используемые для аэрации смеси сточной воды и активного ила в закрытых циркуляционных окислительных каналах механические аэраторы имеют ряд недостатков, а именно: энергоемкость, малый эксплуатационный ресурс, износ сальников, малый перенос кислорода в сточные воды. Для повышения эффективности работы механических аэраторов, применение системы пневматической аэрации в закрытых циркуляционных окислительных каналах, позволит повысить качество биологической очистки сточных вод.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является разработка способа интенсификации работы существующих циркуляционных окислительных каналов закрытого типа, для очистки сточных вод от малых городов и поселков Украины. Одним из направлений повышения интенсификации,

процесса аэрации сточных вод в закрытых циркуляционных окислительных каналах является использование комбинированных систем пневматической и механической аэрации.

При проведении исследований, по повышению интенсификации процесса аэрации сточных вод, по разработанной технологической схеме работы закрытых циркуляционных окислительных каналов с использованием систем пневматической аэрации и существующей механической аэрации, определены контрольные точки отбора количества растворенного кислорода в смеси сточной воды и активного ила, БПК и аммония солевого [12, 14, 18, 22-25].

В соответствии с существующей технологической схемой эксплуатации сооружений, циркуляционный активный ил, после вторичных вертикальных отстойников, поступает в резервуар активного ила и далее насосным агрегатом по напорному трубопроводу поступает непосредственно в систему распределительных лотков, по которым сточные воды самотеком подаются в закрытые циркуляционные окислительные каналы. Регулировка количества подаваемой смеси сточной воды и активного ила осуществляется с помощью щитовых затворов вручную.

Для подачи сжатого воздуха в систему пневматической аэрации, был использован, подобранный на основе технического задания, компрессор 3D38C-100 (производитель фирма «Кубичек», Чехия). В качестве аэрационных элементов (рис. 2.), использованы трубчатые аэраторы АПКВ-120 (аэратор полимерный, каркасный с воздушным зазором, длиной 2,0 м и наружным диаметром 120 мм), производитель фирма «ЭКОТОН», Украина. Характеристика каркасного трубчатого полипропиленового аэратора АПКВ-120 представлена в таблице 1.

Исследования по повышению интенсификации процесса аэрации сточных вод, проводились при подключении струйной механической аэрации к напорным трубопроводам подачи циркуляционного активного ила в закрытые циркуляционные окислительные каналы.

Использование пневматической аэрации в циркуляционных окислительных каналах считается неэффективным, потому что из-за небольшой глубины, не более 1,2 метров, время контакта пузырьков воздуха со сточными водами ограничено. Для увеличения времени контакта пузырьков воздуха со сточными водами предлагается создать гидравлические условия, при которых траектория движения пузырьков воздуха увеличится не менее чем в 2-3 раза. Осуществление поставленной задачи возможно при использовании погружных мешалок или применение механической аэрации при

использовании струйных аэраторов с донными раструбными рассеивателями.

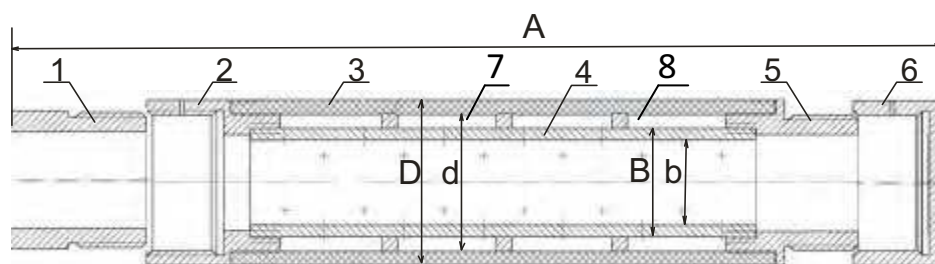


Рис. 2. Конструкция каркасного трубчатого полипропиленового аэратора АПКВ-120

1 - стальная муфта, 2 - муфта с внутренней резьбой, 3 - трубчатый дисперсатор воздуха, 4 - каркас перфорированный, 5 - муфта с наружной резьбой, 6 - заглушка, 7 - воздушный зазор, 8 - кольцо распорное

Fig. 2. Construction of framework tubular polypropylene aerator of APFA - 120

1 - steel muff, 2 - muff with an internal screw-thread, 3 - tubular dispersant of air, 4 - framework perforated, 5 - muff with a male thread, 6 - choke, 7 - air-gap, 8 - spacer ring

Таблица 1. Характеристика каркасного трубчатого полипропиленового аэратора АПКВ-120

Table 1. Description of framework tubular polypropylene aerator of APFA - 120

Наименование	A (мм)	Вес	D (мм)	d (мм)	B (мм)	b (мм)
АПКВ – 1	1035	кг	120	100	90	79,6
АПКВ – 2	2035	кг	120	100	90	79,6

В соответствии с разработанной технологической схемой эксплуатации сооружений, циркуляционный активный ил, после вторичных вертикальных отстойников, поступает в резервуар активного ила и далее насосным агрегатом подается обратно в циркуляционные окислительные каналы через систему механической аэрации с использованием струйных аэраторов с донными раструбными рассеивателями [15, 16, 21]. При разработке и применении системы механической аэрации с использованием струйных аэраторов с донными раструбными рассеивателями, принималось во внимание степень перемешивания смеси, что исключает выпадение хлопьев биоценоза и взвешенных веществ.

Растворение кислорода в системе механической аэрации с использованием струйных аэраторов с донными раструбными рассеивателями происходит в напорном трубопроводе в смеси циркуляционного активного ила и сточной воды [15]. Зависимость количества инжектируемого воздуха от количества рабочей жидкости подающейся с насосной станции прямо пропорционально. При истечении струи циркуляционного активного ила у дна циркуляционного окислительного канала происходит направленное движение потока многофазовой системы через донный раструбный рассеиватель, при подпоре жидкости находящейся в циркуляционном окислительном

канале. В первый момент пузырьки воздуха отрываются на меньшие радиусы, а вторая фаза, имея большую плотность, преодолевает сопротивление подпора, создающееся водой в циркуляционном окислительном канале. Когда у струи, истекающей из донного раструбного рассеивателя, теряется энергия и уравнивается сила подпора, изменяется траектория движения [10, 15]. Таким образом, образуются две траектории перемешивания: первая – малый круг, вызванная пузырьками воздуха, и вторая – большой круг, вызванный направленным движением смеси сточной воды и активного ила в циркуляционном окислительном канале.

Высокая стоимость импортных погружных мешалок, сложность конструкции для их установки и обслуживания, установка не менее 6 штук, для функционирования исследуемых циркуляционных окислительных каналов, ставит под сомнение возможность их применения.

При использовании системы механической аэрации с использованием струйных аэраторов с донными раструбными рассеивателями для повышения эффективности пневматической аэрации циркуляционный окислительный канал делится на две зоны: зона активной аэрации и активного перемешивания, и аноксидной зоны с пассивным перемешиванием. В зоне активной аэрации и активного перемешивания, для подачи воздуха в закрытые циркуляционные

окислительные каналы, по дну прокладываются трубчатые пневматические аэраторы под углом и в количестве согласно расчетных параметров [18, 23].

Принципиальная схема работы экспериментальной установки системы пневматической аэрации в закрытом циркуляционном окислительном канале, для повышения интенсификации процесса аэрации сточных вод, состоит из двух блоков аэрационных элементов, в которых использованы трубчатые аэраторы АПКВ-120. Первый блок аэрационных элементов размещен на бетонных пригрузах, которые расположены по дну, в первом коридоре закрытого циркуляционного окислительного канала, на расстоянии 10 метров до механического горизонтального аэратора. Второй блок аэрационных элементов размещен на бетонных пригрузах, которые расположены по дну, в первом коридоре закрытого циркуляционного окислительного канала, на расстоянии 10 метров после механического горизонтального аэратора.

Исследования проводились при постоянно работающем механическом горизонтальном аэраторе и компрессоре. Данная работа осуществлялась путем закрытия сбросной задвижки Ø100, на подающем напорном трубопроводе циркуляционного активного ила в закрытые циркуляционные окислительные каналы, которая установлена над подающим сточные воды в ЦОК лотком. И далее открытием

задвижки Ø100 на напорном трубопроводе, по которому циркуляционный активный ил поступал на струйные механические аэраторы, которые установлены в начале первого коридора закрытого циркуляционного окислительного канала. Система механической аэрации, во время работы, не только насыщает смесь активного ила и сточной воды кислородом и перемешивает, но при прохождении направленного потока сточных вод над блоком аэрационных элементов, захватывает пузырьки воздуха, тем самым увеличивая его путь в 2,5-3 раза.

На основании полученных данных, при сравнении результатов до проведения экспериментов и при проведении экспериментов, по интенсификации процесса аэрации сточных вод в закрытых циркуляционных окислительных каналах с использованием системы пневматической аэрации и механической аэрации, установлено, что на участке от середины первого коридора и на протяжении второго коридора, наблюдается увеличение количества растворенного кислорода на 1,15-2,0 мг/л. При опорожнении от сточных вод закрытого циркуляционного окислительного канала, на дне не обнаружено отложения осадков.

Результаты количества растворенного кислорода при сравнении предложенных технологических схем по интенсификации системы аэрации смеси сточных вод и активного ила в закрытых циркуляционных окислительных каналах представлены в виде графика на рис. 3.

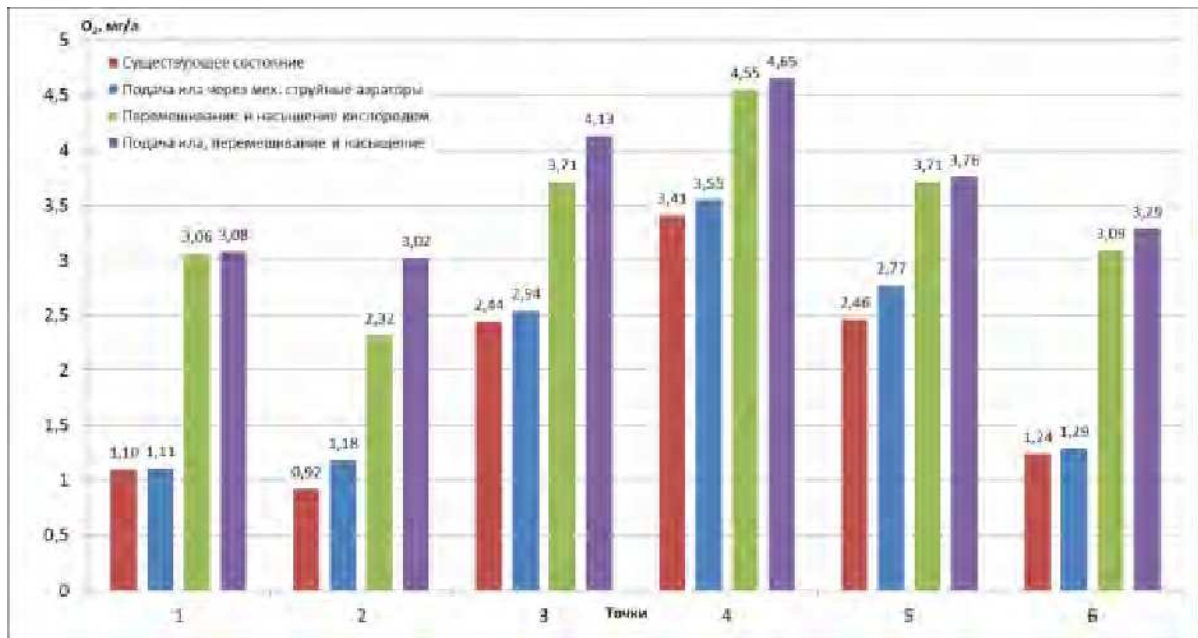


Рис. 3 Результаты количества растворенного кислорода при сравнении предложенных технологических схем по интенсификации системы аэрации смеси сточных вод и активного ила в закрытых циркуляционных окислительных каналах

Fig. 3 Results of dissolved oxygen in the comparison of the proposed process flow on the intensification of the aeration system mixture of wastewater and active sludge in closed circulation oxidative channels

ВЫВОДЫ

Таким образом, проведенные исследования по интенсификации процесса аэрации сточных вод в закрытых циркуляционных окислительных каналах показали, что без усложнения систем аэрации сточных вод достаточно сложно добиться удовлетворительных результатов очистки сточных вод. Использование в технологической схеме эксплуатации закрытых циркуляционных

окислительных каналов, системы циркуляции активного ила, после вторичных вертикальных отстойников, через систему механической аэрации с использованием струйных аэраторов, позволяет интенсифицировать перемешивание сточных вод и активного ила, исключая при этом, затраты на электроэнергию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Водовідведення і очищення стічних вод міста: Навчальний посібник / [Г.М. Смірнова, С.М. Епоян, І.В. Корінько та ін.]. – Харків: Каравела, 2003. – С.144.

2. Водовідведення та очистка стічних вод міста: Навчальний посібник / [О.А. Василенко, С.М. Епоян, Г.М. Смірнова та ін.]. – Київ-Харків: ТОВ «ТО Ексклюзив», С.2012. – 540.

3. Водоотведение и очистка сточных вод. Учебник для вузов / [С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, Ю.М. Ласков, В.И. Калицун]. – М.: Стройиздат, 1996. – С.591.

4. Давиденко А.И. Интенсификация действующих сооружений механической очистки сточных вод / Давиденко А.И. // Экологія, технологія, економіка, водопостачання, каналізація (ЕТЕВК-2009): міжнар. конгр., 1-5 червня 2009 р.: зб. доп. – Ялта, 2009. – С. 283-286.

5. EU Environment Directorate. Phosphates and Alternative Detergent Builders – Final Report. Wre Ret: UC 4011 yune, 2002. – 334.

6. Канализация населенных мест и промышленных предприятий / [Н.И. Лихачев, И.И. Ларин, С.А. Хаскин и др.]; под общ. ред. В.Н. Самохина. – [2-е изд. перераб. и доп.]. – М.: Стройиздат, 1981. – 639 с. – (Справочник проектировщика).

7. Кравченко О.В. Основні проблеми очищення стічних вод в сучасних умовах / О.В. Кравченко, В.Ф. Скупченко, Л.І. Глоба // Экологія, технологія, економіка, водопостачання, каналізація (ЕТЕВК-2005): міжнар. конгр., 24-27 травня 2005 р.: зб. доп. – Ялта, 2005. – С. 354-359.

8. Малогабаритные очистные сооружения канализации / [Е.И. Гончарук, А.И. Давиденко, Я.М. Каминский и др.]. – Киев, «Будівельник», 1974. – С.256.

9. Очистка и обеззараживание сточных вод малых населенных пунктов / Э.С. Разумовский, Г.Л. Медриш, В.А. Казарян. – М.: - Стройиздат, 1986. – С.173: ил. – (Охрана окружающей природной среды).

10. Патент України № 96050 С2, С02 F3/20. Радіальний донний дисковий розсіювач. /С.М. Епоян, Ю.І. Штонда, О.Л. Зубко, І.Ю. Штонда. - № а 201001008; Заявлено 01.02.2010; Опубл. 26.09.2011; Бюл. № 18. – С.3.

11. Реконструкция и интенсификация сооружений водоснабжения и водоотведения: [учебное пособие] / [А.А. Василенко, П.А. Грабовский, Г.М. Ларкина и др.]. – Киев-Одесса, КНУСА, ОГАСА, С.2007. – 307.

12. Самохвалова А.И., Шеренков И.А. Очистка сточных вод малых объемов (до 1400 м³/сут) с помощью циркуляционных окислительных каналов. // Науковий вісник будівництва. – Харків, ХДТУБА, ХОТВ АБУ. - 2009. - Вип.52.- С.232-235.

13. Семчук Г.М. Сучасний стан і шляхи реформування підприємств водопровідно-каналізаційного господарства України / Г.М. Семчук // Экологія, технологія, економіка, водопостачання, каналізація (ЕТЕВК – 2005): між нар. конгр., 24-27 травня 2005р.:зб. доп. Ялта. 2005. – С. 13-22.

14. Stepan Epojjan, Irina Shtonda, Yuriy Shtonda, Aleksey Zubko, Yuriy Zvyagintsev. 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 13С. – Simferopol-Lublin. – 2011. С. 91-96.

15. Таварткиладзе И.М. Технология и установка «ИМТЕХ» для очистки сточных вод / И.М. Таварткиладзе, О.М. Нечипор // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. – 2005. – Вип. 30, Т.2. – С. 234-241.

16. Титов А.А. Направление интенсификации биоогуляционной обработки городских сточных вод / А.А. Титов, С.М. Епоян, Г.С. Пантелей // Строительство и экология: XXVII науч.-техн. конф. ХГАГХ: тез. докл. – Харьков: ХГАГХ, 1996. – С. 28.

17. Хенце М. Очистка сточных вод / М. Хенце, П. Армоэс, Й. Ля-Кур-Янсен, Э. Арван; [пер. с англ.]. – М.: Мир, 2006. – С.480.

18. Штонда Ю.И., Епоян С.М., Зубко А.Л. Интенсификация биологической очистки сточных вод в циркуляционных окислительных каналах на КОС г. Килия Одесской области. // Науковий вісник. - Одеса, ОДАБА. - 2011.- Вип.42.- С.301-306.

19. Епоян С.М. Повышение эффективности биологической очистки и доочистки сточных вод в закрытых циркуляционных окислительных каналах / С.М. Епоян, И.Ю. Штонда, Ю.И.

Штонда, А.Л. Зубко, Яна Лешенарова // Науковий вісник будівництва. - Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ. - 2014. - Вип. 1(75). - С. 106-108.

20. Эпоян С.М. Повышение эффективности очистки сточных вод от соединений азота на малогабаритных канализационных очистных сооружениях / С.М. Эпоян, И.Ю. Штонда, Ю.И. Штонда, А.Л. Зубко // Науковий вісник будівництва. - Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. - 2011. - Вип. 63. - С. 493-498.

21. Эпоян С.М. Применение метода биокоагуляции при эксплуатации системы биологической очистки сточных вод на КОС «Алушта» в осенне-зимний период для энергосбережения / С.М. Эпоян, В.М. Атаманчук, Ю.И. Штонда, А.Л. Зубко // Науковий вісник будівництва. - Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. - 2008. - Вип. 50. - С. 161-166.

22. Эпоян С.М., Штонда И.Ю. Повышение эффективности биологической очистки сточных вод в циркуляционных окислительных каналах. // Науковий вісник будівництва. - Харків, ХДТУБА, ХОТВ АБУ. - 2011. - Вип.64. - С.252-255.

23. Эпоян С.М., Штонда И.Ю. Существующее состояние очистки сточных вод на малых канализационных очистных сооружениях в АР Крым. // Науковий вісник будівництва. - Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ. - 2012. - Вип.71. - С.366-370.

24. Эпоян С.М., Штонда И.Ю., Штонда Ю.И., Зубко А.Л., Звягинцев Ю.М. Интенсификация работы малогабаритных

канализационных очистных сооружений с использованием солнечной энергии. // Motrol. Motorization and power industry in agriculture. - Volume 12 C. - Simferopol - Lublin. - 2010. - С. 315-321.

25. 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, 12-16 вересня 2011 р. Україна, м. Алушта, АР Крим. Збірник наукових статей. - том I, - С. 323-326.

26. Яременко Л.В. Современные приемы интенсификации работы канализационных очистных сооружений / Л.В. Яременко, Н.Д. Лессик, В.Ф. Осадчий, А.В. Осадчий // Екологія, технологія, економіка, водопостачання, каналізація (ЕТЕВК-2005): міжнар. конгр., 24-27 травня 2005 р.: зб. доп. - Ялта, 2005. - С. 323-329.

INTENSIFICATION PROCESS OF SEWAGE AERATION IN THE CLOSED CIRCULATION OXIDIZING CHANNELS

Summary: results over of researches are brought on intensification process of sewage aeration for the increase of efficiency bioscrubbing in the closed circulation oxidizing channels.

Key words: waste water constructions, waste water, aeration, biological treatment, closed circuit oxidative channels.

ПЕНОГЕНЕРАТОР ВЫСОКОКРАТНЫХ ПЕН ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗОПРОВОДОВ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Александр Редько, Игорь Капцов

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры
Адрес: Украина, г. Харьков, ул.Сумская,40
E-mail: lev68@ukr.net

Аннотация. Пеногенератор позволит создавать высокократные пены в закрытой системе под высоким давлением для очистки внутренней полости газопроводов от отложений. Полученная в пеногенераторе пена обеспечивает смачивание механических частиц, прилипание, большую поверхность контакта, снижение сил поверхностного натяжения на поверхности контакта, капиллярный эффект, процесс всасывания отложений, поршневание и вынос их из зоны очистки.

Ключевые слова: пеногенератор, высокократная пена, очистка.

ВВЕДЕНИЕ

Сеть газопроводов, как местного назначения, так и магистральных, совместно с газовыми промыслами и подземными хранилищами объединены в единую газоснабжающую систему страны. От четкой работы каждого звена зависит эффективность всей системы.

От качества газа, транспортируемого по газопроводам, зависит эффективность работы последних. Один из основных факторов, снижающих пропускную способность газопроводов – накопление в них жидкости, механических примесей, продуктов коррозии.

Источником накопления жидкости может быть капельная жидкость (вода и конденсат), поступающая из скважин вместе с газом, конденсат воды и тяжелых углеводородов, образующийся при снижении температуры газа при его движении по трубопроводу, а также жидкость, уносимая потоком газа из сепараторов.

Интенсивность накопления жидкости зависит от скорости движения газа и профиля трассы трубопровода. На горизонтальных и нисходящих участках трассы жидкость движется в виде пленки по стенкам трубы. Наибольшее количество жидкости скапливается на восходящих участках трубопровода, образуя гидравлический затвор, частично или полностью перекрывающий сечение трубы. Наличие в газе жидкости, механических примесей значительно увеличивает гидравлическое сопротивление газового потока.

В настоящее время многие эксплуатируемые газоконденсатные месторождения находятся на стадии исчерпания энергии избыточного перепада давления и поддержания режима сепарации газа при отрицательных температурах, что требует дополнительных затрат. В связи с этим на многих месторождениях установки комплексной подготовки газа (УКПГ) работают в режиме, не обеспечивающем однофазный транспорт газа по газопроводам. В результате с газовым конденсатом вносятся в газосборные сети соли в диспергированном виде в количествах, превышающих их растворимость, что приводит к

выпадению солей на внутренней поверхности труб и установке комплексной подготовки газа. Отложение солей значительно повышает гидравлическое сопротивление газосборных трубопроводов и влияет на температурный режим технологического процесса. Аналогичные отложения определены и во внутренней полости межпромысловых и городских газопроводов.

Исследование проб, отобранных из внутренней полости промысловых газопроводов Шебелинского, Крестищенского, Мелиховского, Ефремовского и других месторождений свидетельствуют о наличии в продуктах отложений углеводородного конденсата, воды, минерального шлама [9].

Анализ механических примесей жидких загрязнений конденсатно-водной смеси показывает, что они в основном состоят из глинистых частиц с линейными размерами 0,005мм и менее, 50% которых имеют карбонатное происхождение.

Кроме глинистых частиц имеются частицы кварца, гематита, магнетита и других минералов с линейными размерами до 0,01 мм [12].

Понижение температуры транспортируемого газа ниже уровня температуры точки росы и температуры сепарации на УКПГ способствует процессу конденсации влаги и углеводородов во внутренней полости промысловых и магистральных газопроводов. В связи с этим определение зон конденсации требует сравнения температур газа на выходе из УКПГ и по длине газопровода. Учитывая, что природным газам присуще явление ретроградной конденсации, контроль за температурой точки росы газа необходимо осуществлять в нескольких местах по длине газопровода. Давление, при котором происходит максимальная конденсация, находится в диапазоне 4.5-5.5 МПа [3]. При снижении давления транспортируемого газа ниже давления максимальной конденсации температура точки росы газа по углеводородам понижается.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Различают три основных метода очистки внутренней полости трубопроводов: продувка, промывка, очистка специальными устройствами и комбинация этих способов. В зависимости от технических, технологических и других факторов применяют тот или иной способ очистки.

Проанализируем методы и отдельные технические решения очистки внутренней полости газопроводов. Наиболее простым методом очистки трубопроводов считается продувка газом под давлением через открытое сечение трубы. Развивая большую скорость за счет перепада давления, поток газа выносит содержимое в течение определенного периода времени. При продувках длинных участков эффективность процесса очистки по длине не одинакова. В начале участка, где скорость потока ниже, чем в конце, вынос отложений будет меньше. Недостаток такого метода заключается в потерях больших объемов газа и загрязнения окружающей среды. После строительства трубопровода продувку через открытое сечение осуществляют с одновременным пропуском очистных поршней или скребков [11].

Продувка газом от скважин через открытое сечение невозможна ввиду больших перепадов давлений в начале и конце участка. Дросселирование давления на устье скважины до необходимой величины для нормальной продувки (0.6-0.8 МПа) создает условия образования гидратов в запорной арматуре и шлейфах. Наличие большого количества шлейфов, потери газа, загрязнение окружающей среды усложняет техническое решение и выполнение этого метода.

Схема продувки газопровода с одновременным пропуском поршня, когда в качестве рабочего тела используется природный газ, включает в себя: ресивер, участок газопровода, байпас с краном, секущий кран. На продувочном патрубке в конце очищаемого участка приваривается отборник с краном для определения степени концентрации кислорода в газозудной смеси. Очистной поршень запасовывается в начале участка газопровода между секущим краном и местом подключения байпаса. Байпас необходим для вытеснения природным газом воздуха, находящегося в очищаемом участке. В качестве ресивера используется участок газопровода, заполненный природным газом. Перед запуском очистного поршня следует провести вытеснение воздуха. После вытеснения воздуха запускается очистной поршень и происходит процесс очистки.

Очистка шлейфов, промышленных трубопроводов, городских газопроводов, речных переходов, газопроводов-отводов путем продувки затруднительна.

В последнее время доминирует технология очистки внутренней полости магистральных газопроводов с помощью очистительных устройств

различных конструкций и принципов действия [5]. Технологический процесс очистки газопроводов осуществляется без остановки его работы и состоит из трех основных элементов: процесса запуска очистного устройства, процесса контроля его прохождения по очищаемому участку, процесса приема продуктов очистки и очистного устройства в конце очищаемого участка. Для запуска и приема очистных устройств сооружаются специальные станции, включающие камеры запуска и приема, сигнальную систему, утилизационные емкости, подъемные механизмы очистных устройств, технологическую обвязку и другое оборудование.

Станции запуска и приема очистных устройств располагаются в непосредственной близости от компрессорных станций на расстоянии 80-100 км по трассе газопроводов. Камера запуска имеет систему трубопроводов для продувки ее перед заполнением газом после запасовки очистного устройства. Герметизируется камера специальным затвором или равнопроходным краном. Запуск очистного устройства может проходить при работающей и остановленной КС. Все действия по запуску и приему очистных устройств сводятся к системе переключений запорной арматуры.

Очистное устройство в процессе очистки периодически запускается во внутреннюю полость и потоком газа движется по трассе до камеры приема. При движении очистного устройства впереди его (по ходу движения) накапливаются загрязнения, которые транспортируются до приема их в утилизационные емкости. На момент приема очистного устройства и продуктов очистки компрессорная станция отключается от трассы и работает на кольцо. Продукты очистки выносятся в утилизационные емкости, а очистное устройство принимается в камеру приема.

Речные переходы имеют большой прогиб и отклонение от горизонтального положения, что может привести к застреванию очистного устройства.

Газопроводы-отводы, как правило, меньшего диаметра, чем магистральные газопроводы, что технически усложняет прохождение по ним очистных устройств.

Очистные устройства выгодно применять на газопроводах больших диаметров и на участках длиной 50-100 км.

В рассмотренном случае шлейфы в 8-10 раз меньше по диаметру и единичной протяженности, чем магистральные газопроводы. Наличие промышленного оборудования различного диаметра вносит дополнительные трудности в применении очистных устройств, требует создания специальных конструкций.

В зависимости от назначения трубопровода, характера загрязнений, профиля трассы применяют соответствующие типы и конструкции очистных устройств (поршни, поршни-разделители, шары).

Применить подобную технологию для очистки городских газопроводов, шлейфов, речных переходов, газопроводов-отводов чрезвычайно затруднительно из-за специфики их работы, что привело бы к необходимости установки камер запуска и приема на каждом трубопроводе, что потребовало бы огромных дополнительных капитальных и эксплуатационных затрат. Кроме того, пришлось бы чрезвычайно усложнить систему сбора и подготовки газа на промыслах.

В последние годы в химическом производстве и других отраслях народного хозяйства нашли широкое применение поверхностно-активные вещества (ПАВ). Имеется опыт применения ПАВ для очистки больших емкостей, призабойной зоны скважин, отдельных участков трубопроводов [3,10]. Технология применения ПАВ для очистки отдельных участков трубопроводов некоторыми фирмами США включает многократный их пропуск в виде пены по всему участку с последующей промывкой водой и пропуском скребка[8].

Принципиальная схема образования пенной структуры методом эжектирования в пеногенераторах осуществляется следующим образом. Поток газа подается по специальной трубе, где смонтирован подводный трубопровод раствора пенообразователя и сетка с определенной величиной и количеством ячеек. По подводному трубопроводу подается в поток газа раствор пенообразователя. Полученная газожидкостная смесь в процессе движения частично аэрирует пену перед сеткой, основная масса пенной структуры генерируется на сетке. Капли раствора пенообразователя смачивают сетку, образуя за счет сил поверхностного натяжения пленку, которая потоком газа прогибается по ходу движения до образования сферы, заполненной газовой средой.

Физические свойства и структура пены будут зависеть от геометрических параметров сетки, расхода пенообразователя и скорости потока газа. При больших скоростях кинетическая энергия потока газа срывает и уносит адсорбционные слои создающих пленку структурных ячеек пены, отрицательно воздействуя в целом на процесс пеногенерации. Допустимая скорость потока газа, при которой осуществляется процесс пеногенерации, также зависит от геометрических параметров сетки и свойств пенообразователя и равна [14]:

$$v_{дон} = 0,25 \frac{R_0}{\chi \delta}, \quad (1)$$

где: R_0 - величина, характеризующая свойства и концентрацию пенообразователя;

δ - площадь сечения ячейки сетки;

χ - количество ячеек, образующих площадь набегания потока газа. Для раствора

пенообразователя (4-6%) величина $R_0 = 0,006 - 0,09 \text{ м}^3/\text{сек}$.

Эффективность образования пенной структуры зависит от степени смешения газожидкостной смеси и размеров капель жидкой фазы, содержащейся в газовом потоке по отношению к размерам ячеек сетки. Критерий устойчивости пенообразования в зависимости от размера капель пенообразователя определяется выражением [20]:

$$r \geq a\sqrt{2}, \quad (2)$$

где: r - средний радиус капли раствора пенообразователя;

a - линейный размер квадратной ячейки сетки.

Выразим уравнение (2) для среднего радиуса капли через площадь ячейки сетки, и, подставив в уравнение (1), получим уравнение максимально допустимой скорости потока газа процесса пеногенерации:

$$v_{дон} = 0,25 \frac{2R_0}{\chi r^2} = 0,5 \frac{R_0}{\chi r^2} = \frac{R_0}{2\chi r^2}. \quad (3)$$

Учитывая перечисленные факторы и критерии, влияющие на процесс образования и свойства пенных структур, разрабатывалась конструкция пеногенератора, способная образовывать высокократную, устойчивую пену в газопромысловых условиях. Попытки применить имеющиеся конструкции и методы генерации пены в промысловых условиях не дали эффективных результатов по следующим причинам.

Применяемые конструкции и методы генерации рассчитаны на низкие давления рабочих сред, а в качестве газовой среды используется воздух. В промысловых условиях необходимо применять в качестве рабочего тфза природный газ, подаваемый из газопроводов скважин газовых или газоконденсатных месторождений в широком диапазоне высоких давлений 5,0 - 25,0 МПа.

Однако в целом вопрос применения ПАВ для очистки газопроводов еще мало изучен, но успешное применение их для аналогичных целей в других отраслях требует проведения широких исследований для очистки внутренней полости городских газопроводов шлейфов, речных переходов, газопроводов-отводов.

В качестве ПАВ для очистки шлейфов и промысловых газопроводов могут использоваться ОП-7, ОП-10 и другие жидкости, применяемые для очистки призабойной зоны скважин. Эффективность очистки с применением ПАВ находится на уровне 80-95%[4].

Известно, что эффективность очистки зависит от характера загрязнений, физико-химических свойств пенообразователя, термогазодинамических условий.

Поверхностно-активные вещества за счет наличия упругих эластичных жидкостных пленок обладают свойствами обволакивать и изолировать друг от друга частицы загрязнений [2].

Структура пен, во многом зависит от величины кратности (K), характеризующей отношение объема пены к величине объема раствора пенообразователя, из которого она получена:

$$K = \frac{V_n}{V_{pn}} = \frac{V_{\bar{a}} + V_{pn}}{V_{pn}}, \quad (4)$$

где: V_n – объем пены, образованной при вспенивании пенообразователя,

$V_{\bar{a}}$, V_{pn} – объемы газа и раствора пенообразователя.

Пены условно подразделяют на низкократные ($1 < K < 20$), средней кратности ($20 < K < 200$) высокократные ($K \geq 20$). Повышенная кратность пены уменьшает единичный объем ячеек и увеличивает их количество в общем объеме, резко увеличивая поверхность контакта.

Результаты исследований показывают, что устойчивость пены зависит от свойств пенообразователя, концентрации вещества в растворе, свойств контактирующего с ПАВ вещества, способа образования пены и других факторов [20].

Для повышения устойчивости пен применяют стабилизаторы, роль которых могут выполнять как химические вещества (высшие жирные спирты, алкиларилсульфонаты, алкилсульфаты, соли дикарбоновых кислот и др.), так и твердые частицы (глина, песок, продукты коррозии и др.).

С повышением давления физико-химические структуры изменяются. Проведенные исследования Амином В.А. свидетельствуют о снижении сил поверхностного натяжения (σ) с увеличением давления [3]:

$$\sigma = \sigma_0 - B(P - P_0) + C(P - P_0)^2, \quad (5)$$

где: P , P_0 – давление в системе и атмосферное, B , C – специфические константы.

Кратность пены с повышением давления в системе, где она получается, уменьшается, а устойчивость – увеличивается. При давлении газа в закрытой системе 6,0 МПа устойчивость водной пены увеличивается более, чем в 5 раз по сравнению с устойчивостью пены, полученной в атмосферных условиях. Однако в контакте с минерализованными водами и газовым конденсатом пены снижают свою устойчивость и разрушаются.

Обладая одновременно физико-химическими свойствами газа, жидкости и твердого тела, пена обеспечивает при очистке такие процессы: смачивание механических частиц, прилипание (флотацию), большую поверхность контакта, снижение сил поверхностного натяжения и

поверхности контакта, капиллярный эффект, процесс всасывания загрязнений, поршневание и вынос загрязнений из зоны очистки.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Для реализации методов генерации пенных структур разрабатываются различные конструкции устройств и аппаратов. В горнорудной промышленности применяют специальные устройства (пенногенераторы), в которых образуется пена для удаления пыли и гашения пожаров [14].

Анализируя методы и конструкции аппаратов образования пенных структур можно сделать вывод, что для очистки внутренней полости трубопроводов наиболее приемлем метод эжектирования потоком природного раствора пенообразователя и образованием пены в пенногенераторах. В пенногенераторах пена образуется после смешения газовой и жидкой фаз на специальных сетках, расположенных перпендикулярно направлению движения смешанного потока. На основании этой принципиальной схемы разработаны различные конструкции пенногенераторов [17;15;1].

Пенногенерация должна проходить в закрытой системе изолировано от внешней среды, что накладывает определенные условия на конструкцию пенногенератора. Газовая фаза, подаваемая в пенногенератор из газопровода, скважин на месторождениях, может содержать примеси воды, конденсата. Система пенногенерации должна предусматривать ручное и автоматическое регулирование подачи пенообразователя с целью оптимального режима пенногенерации и очистки промышленных газопроводов.

На рис. 1 показана конструкция газового пенногенератора высокого давления. Пенногенератор состоит из цельнометаллического корпуса 1, рассчитанного на высокое давление, внутри которого размещены соосно три камеры. Первая сужающаяся камера конфузур, соединена с камерой смешения, которая, в свою очередь, соединена с узкой частью расширяющейся камеры – диффузором. В конце расширяющейся части диффузора находится сетка, выполненная в виде конуса. Вершина конуса направлена в сторону камеры смешения навстречу движению потока смеси. В сужающейся части конфузур размещена форсунка 2 впрыска в поток газа пенообразователя, в хвостовой части форсунки подключается подводный трубопровод пенообразователя 3. Камера смешения имеет по всей длине одинаковый диаметр, внутри камеры находится турболизатор 4 и датчик давления 5. С внешней стороны камеры смешения установлены фиксаторы 6, обеспечивающие фиксацию и жесткость газодинамической части и корпуса пенногенератора. На выходе генератора к корпусу 1 крепится винтами 8 сетка и выходная часть диффузора. Корпус пенногенератора монтируется к газопроводу посредством фланцевых соединений 9,10. На

выходе из пеногенератора смонтировано смотровое окно 11 и датчик кратности пены 12.

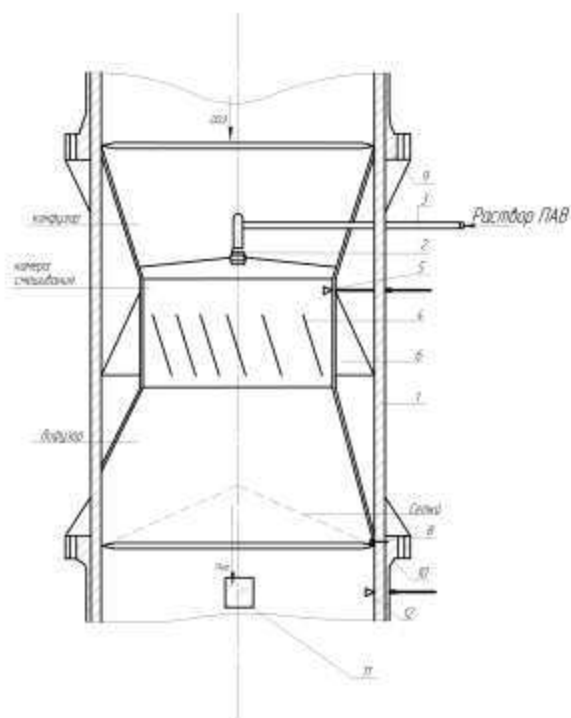


Рис. 1. Общий вид газопромыслового пеногенератора
Fig. 1. General type of the gascommercial sputtergenerator

Пеногенератор монтируется на линейной части газопровода или на специальном байпасе. Поток газа последовательно проходит конфузор, камеру смещения, диффузор и сетку. В конфузоре поток газа увеличивает свою скорость за счет уменьшения площади поперечного сечения. Максимальную скорость поток газа приобретает на выходе из конфузора, где через форсунку впрыскивается раствор ПАВ. Образовавшаяся двухфазная смесь попадает в камеру смешения, где происходит интенсивное перемешивание жидкой и газообразной фазы. С целью эффективного перемешивания в смесительной камере находится завихритель, на входе в который капли раствора ПАВ размельчаются в направляющем аппарате и равномерно перемешиваются в газовой среде. После перемешивания двухфазная смесь попадает в диффузор, где скорость его снижается за счет увеличения площади поперечного сечения в дозвуковом режиме течения. На выходе из диффузора двухфазная смесь попадает на сетку, на которой генерируется пена и попадает в газопровод. Частично пена начинает образовываться в завихрителе, где образуется турбулизация потока. В месте движения пены из пеногенератора через смотровые окна производится визуальный контроль качества и структуры пены. Автоматический контроль процесса пеногенерации осуществляется

посредством датчика кратности пены. Манипулируя вентилем подачи раствора ПАВ на форсунку, подбирается оптимальный режим пенообразования для заданной скорости потока газа.

Конструкция пеногенератора позволяет также подбирать оптимальный режим пенообразования при постоянном расходе раствора пенообразователя ПАВ изменением скорости потока газа манипуляцией одновременно двумя параметрами.

Разработанная схема и конструкция пеногенератора (рис. 1) дают возможность получать пену для очистки внутренней полости газопроводов.

В газовой динамике для расчета газовых течений применяются газодинамические функции, зависящие от коэффициента скорости (λ), которые могут быть применены для газодинамического расчета пеногенератора [1]

$$\lambda = \frac{W}{a_{\text{эб}}} \quad (6)$$

где W - скорость газа в сечении пеногенератора;
 $a_{\text{кр}}$ - критическая скорость газа, равная скорости звука в том же сечении.

Газодинамические функции отражают изменение температур, давлений, плотности от изменения коэффициента скорости и удобны для расчета газовых потоков, так как позволяют упростить преобразование уравнений газовой динамики и облегчают вычислительную работу. В отдельных работах для них составлены таблицы, графики и выведены формулы, связывающие температуры, давления, плотности и коэффициент скорости [6,16]:

$$t(\lambda) = \frac{T}{T_0} = 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2, \quad (7)$$

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{\rho}{\rho_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{1}{k-1}} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}}, \quad (8)$$

$$\pi(\lambda) = \frac{P}{P_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{1}{k-1}} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}}, \quad (9)$$

$$q(\lambda) = \frac{F_{\text{эб}}}{F} = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda \cdot \varepsilon(\lambda), \quad (10)$$

где: T, T_0 – температура газа в заторможенном состоянии (на входе) и в потоке;
 ρ_0, ρ - плотность газа в заторможенном состоянии (на входе) и в потоке;
 P_0, P – давление газа в заторможенном состоянии (на входе) и в потоке;

$F_{кр}$, F -площади поперечного сечения потока при критическом и докритическом режимах течения

k - показатель адиабатического процесса газа.

Основным компонентом в составе природного газа является метан. На рис.2 показаны зависимости газодинамических функций от коэффициента скорости для метана $k=1,3$.

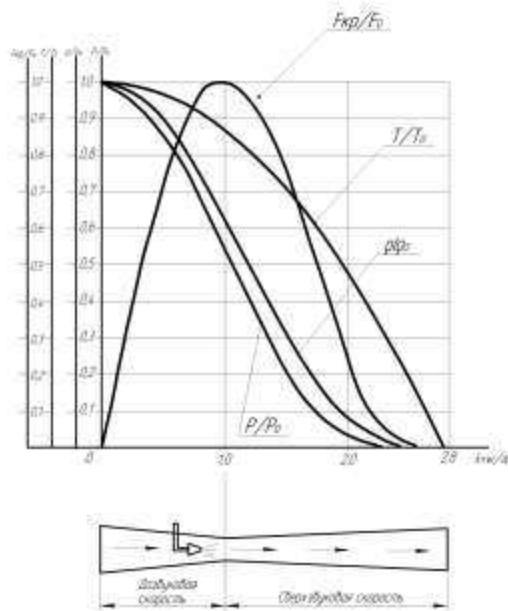


Рис. 2. График зависимости газодинамических функций от коэффициента скорости пеногенератора

Fig. 2. Graphs to dependencies gasdynamic function from factor of the velocities spume-generator

Расход газа через пеногенератор будет равен:

$$G_{\text{мас}} = \rho F \omega. \quad (11)$$

Выразить плотность ρ в потоке газа пеногенератора через параметры состояния на входе в него, учитывая уравнение (8):

$$\rho = \rho_0 \left(1 - \frac{k-1}{k+2} \lambda^2 \right)^{\frac{1}{k-1}}. \quad (12)$$

Из уравнения Клайперона ρ_0 равно:

$$\rho_0 = \frac{P_0}{RT_0}. \quad (13)$$

Тогда:

$$\rho = \frac{P_0}{RT_0} \left(1 - \frac{k-1}{k+2} \lambda^2 \right)^{\frac{1}{k-1}}. \quad (14)$$

Скорость в пеногенераторе выразим через критическую скорость и коэффициент скорости:

$$\omega = \lambda a_{\text{эо}}. \quad (15)$$

Скорость звука есть волны давления, распространяющиеся при бесконечно малых возмущениях, и определяется:

$$a^2 = \frac{P - P_0}{\rho - \rho_0} = \frac{dP}{d\rho}. \quad (16)$$

При адиабатическом процессе соотношение давлений и плотностей согласно уравнения Пуассона выражается:

$$\frac{P}{\rho^k} = \frac{P_0}{\rho_0^k}. \quad (17)$$

Откуда:

$$P = P_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^k. \quad (18)$$

Продифференцируем уравнение (17, 18) и подставим в выражение (16) получим:

$$a_{\text{эо}}^2 = \frac{dP}{d\rho} = k \frac{P_0}{\rho_0^k} \rho^{k-1} = \frac{kP}{\rho}. \quad (19)$$

С учетом уравнения Клайперона, уравнение (19) примет вид:

$$a_{kp}^2 = \sqrt{kPT_{kp}}. \quad (20)$$

Температура потока газа в пеногенераторе при критическом истечении ($\lambda=1$) выразим через температуру газа на входе в него согласно уравнению (7):

$$\frac{T_{kp}}{T_0} = \frac{2}{k+1}; \quad T_{kp} = \frac{2T_0}{k+1}. \quad (21)$$

С учетом уравнений (11), (15), (22) скорость газа в пеногенераторе будет равна:

$$\omega = \lambda \sqrt{kP \frac{2T_0}{k+1}}. \quad (22)$$

Подставим выражения (12), (23) в уравнение (21), получим:

$$G_{\text{мас}} = \frac{P_0 F}{RT_0} \left(1 - \frac{k-1}{k+2} \lambda^2 \right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda \sqrt{kR \frac{2T_0}{k+1}}. \quad (23)$$

Преобразуем уравнение (23):

$$G_{mak} = \frac{P_0 F}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{\frac{2k}{k+1}} \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda \quad (24)$$

$$= \frac{P_0 F}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{\frac{2k}{k+1}} \lambda \varepsilon(\lambda).$$

Выразим расход газа в пеногенераторе через параметры критического истечения ($\lambda=1$):

$$G_{mac} = \rho \omega F = \rho_{\dot{e}\dot{o}} \dot{a}_{\dot{e}\dot{o}} F_{\dot{e}\dot{o}}. \quad (25)$$

Найдем выражение функции $q(\lambda)$, определяющей соотношение площадей поперечного сечения пеногенератора при критическом и докритическом течениях потока газа:

$$q(\lambda) = \frac{F_{\dot{e}\dot{o}}}{F} = \frac{\rho_0 \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda a_{\dot{e}\dot{o}}}{\rho \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} a_{\dot{e}\dot{o}}} \quad (26)$$

$$= \lambda \left[\frac{\dot{e}+1}{2} \left(1 - \frac{\dot{e}-1}{\dot{e}+1} \lambda^2\right) \right]^{\frac{1}{\dot{e}-1}}.$$

Из уравнения (8) выражение $\varepsilon(\lambda)$ равно:

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{q(\lambda)}{\left(\frac{\dot{e}+1}{2}\right)^{\frac{1}{\dot{e}-1}} \lambda}. \quad (27)$$

С учетом уравнения (27) массовый расход газа через пеногенератор выразим как:

$$G_{mak} = \frac{P_0 F}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{\frac{2k}{k+1}} \frac{q(\lambda)}{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}}. \quad (28)$$

Обозначим в уравнении (28) коэффициентом (m) комплекс:

$$m = \frac{1}{\sqrt{R}} \sqrt{\frac{2k}{k+1}} \left(\frac{2}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}} = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{k-1}\right)}} \sqrt{\frac{1}{R}} \quad (29)$$

$$= \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \sqrt{\frac{1}{R}}.$$

С учетом комплекса (m) выражение массового расхода примет вид:

$$G_{max} = m \frac{P_0 F}{\sqrt{T_0}} q(\lambda). \quad (30)$$

Значения комплекса (m) для метана ($k=1,3$; $R=53$ кгм/кг⁰С).

Площадь поперечного сечения пеногенератора до камеры смешения включает площадь сечения форсунки пенообразователя. С учетом этого фактора площадь пеногенератора в месте установки форсунки будет равна:

$$F_2 = F_3 - F_1. \quad (31)$$

Для распыления и смешения газа и пенообразователя используется форсунка, устанавливаемая соосно во внутренней полости пеногенератора. Наиболее надежными в работе на промышленных газопроводах являются центробежные и струйные форсунки. В центробежных форсунках распыление закрученной тангенциальными каналами жидкости происходит в результате распада пены, образующейся на выходе из сопла форсунки. В струйных форсунках при достаточно больших скоростях течения распыление жидкости осуществляется за счет кинетической энергии струи. Основными гидравлическими характеристиками любого типа форсунок являются: величина коэффициента расхода (μ), дисперсность или мелкость распыления, характеризующаяся средним или медианным диаметрами капли, а для центробежных форсунок, кроме того, угол конуса распыления и равномерность распределения жидкости по длине окружности конуса распыления.

Для эффективного пенообразования на решетке пеногенератора необходимым условием является максимальное распыление и перемешивание газа и пенообразователя на незначительном участке движения газового потока, которым является смесительная камера. Наиболее полно таким условиям отвечают центробежные форсунки, в которых жидкость при истечении на выходе имеет осевую и тангенциальную составляющие скорости, образуя факел распыления в виде полого конуса. Центробежная форсунка состоит из входных каналов, камеры закручивания и сопла. Если вращение жидкости создается с помощью тангенциальных отверстий, то форсунка называется тангенциальной, если с помощью каналов шнека (завихрителя) – шнековой [1, 6].

Жидкость в центробежной форсунке совершает сложное вращательно-поступательное движение и имеет три составляющих скорости: вращательную, поступательную и радиальную. Истечение жидкости происходит через кольцевое сечение, внутренний радиус которого равен радиусу газового вихря на срезе сопла, внешний – радиусу сопла. Таким образом, форсунка заполнена жидкостью не полностью. Степень заполнения сопла форсунки жидкостью характеризуется коэффициентом живого сечения.

После сетки из пеногенератора на входе в газопровод поступает высокократная пена.

ВЫВОДЫ

В результате исследования была установлена наиболее эффективная технология очистки внутренней полости газопроводов от отложений малых диаметров с применением поверхностно-активных веществ (ПАВ) высокой кратности. Разработанная схема и конструкция пеногенератора позволяет создавать высокочастотную пену в потоке транспортируемого газа под высоким давлением и очистку газопровода. Конструкция парогенератора высокого давления позволяет выбирать оптимальный режим пенообразования при постоянном расходе раствора ПАВ изменением скорости потока газа. Газодинамический расчет пеногенератора дает возможность определить конструктивное решение по заданным параметрам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович Г.Н. 1969. Прикладная газовая динамика /Г.Н. Абрамович – М.: Наука.- 824.
2. Адамсон А. 1979. Физическая химия поверхностей / А. Адамсон перевод с англ. – М.: Мир-568.
3. Амиан В.А. 1976. Экспериментальные исследования по освоению скважин пенами / В.А. Амиан / Нефтепромысловое дело - № 8-24-26.
4. Бабаян Г.А. 1971 Адсорбция ПАВ в процессе добычи/Г.А. Бабаян- М.: Недра.- 200.
5. Бородавкин П.П. 1994 Подземные магистральные трубопроводы П.П. Бородавкин.- М.:Недра.-245-283.
6. Вуколович М.П. 1968. Техническая термодинамика /М.П. Вуколович, И.И. Новиков – М.:Энергия.-496.
7. Грудз Я.В. 2005. Очищення внутрішньої порожнини газопроводів – відводів, обладнаних нерівно прохідною арматурою/Я.В. Грудз, В.Г. Франчук, Щ.М. Шеремет / Навтова і газова промисловість- №2-40-41.
8. Гурвич Л.М. 1994 Многофункциональные композиции ПАВ в технологических операциях нефтедобычи /Л.М. Гурвич, Н.М. Щерстнев-М.: ВНИИОЭНГ.-268.
9. Закревский Л.А. 1972 Очистка магистральных газопроводов от скоплений конденсата и влаги /Л.А. Закревский – М.: Транспорт хранение газа - №1-15.
10. Икин Д.Л. 1966. Исследование пен для очистки призабойной зоны скважин /Д.Л. Инкин, У.Э. Экард – М.: Инженер-нефтяник №9-220.
11. Климовский Е.М. 1966 Продувка и испытание магистральных газопроводов /Е.М. Климовский – М.: Недра -210.
12. Капцов И.И. 1979. Анализ загрязнений внутренней полости газопроводов /И.И. Капцов, В.Н. Гончаров – М.: Газовая промышленность -№8-44-45.
13. Котов А.А. 1972 Применение высокочастотной пены при тушении пожаров /А.А. Котов, И.И. Петров, З.Ч. Реутг-М.: Строиздат-113.
14. Мурадян И.М. 1966 Выбор рационального тока аэропорта./ И.М. Мурадян – М.: Нефтепромысловое дело - №6-14-16.
15. Пажи Д.Г. 1975. Распыливающие устройства в химической промышленности / Д.Г. Пажи, А.А. Корягин, Э.Л. Ламм- М.:Химия-199.
16. Редько А., Бабенко Е., 2013 Усовершенствование расчета газового эжектора для систем газоснабжения. MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. Polish Academy of sciences-Lublin.-Vol.13c.-19.-26.
17. Ребиндер П.А. 1971 Физико-химические принципы применения ПАВ в химической и нефтяной промышленности / П.А. Ребиндер – К.: Наукова умка -210
18. Роменский Л.П. 1976. Пена, как средство борьбы с пылью/А.П. Роменский – К.: Наукова думка-80-104
19. Сайфиев Т.А. 1965. О влиянии ПАВ на образование и отложении гидратов / Т.А. Сафиев, А.И. Лобков- М.: Газовое дело - ВНИИОЭНГ -№6-9-12.
20. Тихомиров В.К. 1975. Пены. Теория и практика их получения и разрушения – М.: Химия -264.

SPUMEGENERATOR HIGHMULTIPLE SPUMES FOR PEELINGS GAS PIPELINE UNDER PRESSURE

Summary. Spumegenerator will allow to create high-multiple suds in the closed system under high pressure for cleaning of internal cavity of gas pipelines from deposits. The suds got in spumegenerator provide moistening of mechanical particles, adhesion, large surface of contact, decline of forces of surface-tension on the surface of contact. Capillary effect, process of suction of deposits, pistoning and bearing-out them from the area of cleaning.

Key words: spumegenerator, high-multiple suds, cleaning.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ГОРИЗОНТАЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ СВАЙ С ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ КОЭФФИЦИЕНТА ЖЕСТКОСТИ ОСНОВАНИЯ

Илья Лучковский, Светлана Есакова

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

Аннотация. В работе рассмотрена предлагаемая модель основания, для расчета горизонтально нагруженных свай в однородном или многослойном основании с нелинейным распределением коэффициента жесткости грунта, основанная на методе Б.Н. Жемочкина. Приводится анализ напряженно-деформированного состояния свай по нескольким методикам и оценка их соответствия натурным и модельным испытаниям.

Ключевые слова: свая, горизонтальная нагрузка, распределение коэффициента жесткости основания по глубине

ВВЕДЕНИЕ

В связи с расширением объемов строительства и реконструкции [6] зданий и сооружений в стесненных условиях городов, а также сложных инженерно-геологических условиях, происходит существенный рост использования свай для фундаментов и ограждающих конструкций котлованов. Кроме того, свайные опоры являются наиболее распространенной конструкцией мостов, спортивных, торговых и других сооружений.

Впервые «Руководство по проектированию свайных фундаментов» (далее «Руководство») [14], содержащее указания по учету горизонтальных и моментных нагрузок, появилось в 1980 г.

Затем был издан ряд норм [1], [16], в которых по-прежнему рекомендована расчетная модель основания с линейно возрастающей по глубине жесткостью. Однако, за эти годы накопились новые экспериментально-теоретические исследования, позволяющие существенно скорректировать положения действующих норм, а кроме того, в ряде случаев получать более экономичные либо более надежные сооружения.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

В настоящее время разработан ряд методов, позволяющих определять горизонтальные перемещения, распределение изгибающих моментов и поперечных сил по длине горизонтально нагруженной сваи. Главную роль в работе системы «горизонтально нагруженная свая-грунт» в стадии эксплуатации играет принятая модель грунтового основания, так как жесткостные характеристики самой сваи при допустимых горизонтальных перемещениях головы сваи обычно могут определяться в упругой стадии.

Наиболее известный метод Винклера-Фусса использует для решения задач взаимодействия грунта и сооружения коэффициент постели.

В модели Винклера грунт характеризуется только одним показателем – коэффициентом постели C_z , равным отношению реактивного давления грунта в рассматриваемой точке контакта σ_z к осадке конструкции y_z .

Исследования, проведенные К.С. Завриевым и Г.С. Шпиро [4] показали, что модель Винклера при принятии экспериментально обоснованного закона распределения коэффициента постели $C(z)$ по глубине дает близкие к реальным значения усилия и перемещений в свайных фундаментах. В работах [4], [5] приведены результаты исследований расчетной ширины свай и определены поправочные коэффициенты для учета взаимного влияния свай, формы поперечных сечений и размеров поперечного сечения свай.

Филатов А.В., Прохоров И.Я., Гуслистая Ж.В. [18], [19] провели ряд экспериментальных исследований эпюр реактивного давления грунта и перемещений свай при горизонтальных и моментных нагрузках. Анализируя результаты экспериментов, Филатов А.В. сделал следующие выводы:

- зависимость между коэффициентом жесткости основания K и глубиной z нелинейная, а функция $K=f(z)$ имеет ярко выраженный выпуклый характер. При значительных перемещениях свай, когда вблизи поверхности возникает зона предельного равновесия грунта и эпюра имеет вогнутое очертание;
- с увеличением горизонтальной нагрузки Q коэффициент K уменьшается.

Авторами [18] была получена эмпирическая зависимость распределения коэффициента постели при работе свай на моментные нагрузки, и также приведены сравнения эпюр коэффициента постели, полученных экспериментальным путем и по эмпирической формуле.

Шеменковым Ю.М. и Миткиной Г.В. [20] в Уфимском НИИПромстрое были проведены экспериментальные исследования фундаментов со

сваями кольцевого сечения для уточнения расчетной схемы фундамента на действие вертикальной и горизонтальной нагрузки. Авторы пришли к выводу, что изменение коэффициента постели пропорционально глубине не подтверждается экспериментами, и предложили рассматривать сваю, со ступенчатой эпюрой коэффициента постели, которая определяется с использованием данных статического зондирования грунта.

Наиболее широкое распространение получил метод расчета фундаментов из свай, свай-оболочек, свай-столбов, разработанный К.С. Завриевым и Г.С. Шпиро [5], включенный в «Руководство» [14], СНиП 2.02.03-85 [16] и используемый рядом авторов [7], [15], [17]. В предложенном методе рассмотрено основание с линейно возрастающим коэффициентом постели при различных граничных условиях, введено понятие условной ширины сваи, что позволило учитывать пространственную работу грунта; даны таблицы значений коэффициента пропорциональности K в зависимости от характеристик грунта и вида свай, разработана методика расчета свайных ростверков при воздействии горизонтальных и моментных нагрузок.

Лучковским И.Я. и Лекумовичем Г.С. был разработан табличный метод решения, вошедший в «Руководство» [10], который существенно упрощает расчет свай (от жесткой – $\alpha_d \cdot l = 2.6$ до абсолютно гибкой – $\alpha_d \cdot l = 4$).

Было разработано ряд комбинированных моделей, в которых использованы разные очертания эпюр изменения коэффициента постели по длине сваи.

Миронов В.В. [12], [13] разделяет сваю на два условных участка: первый участок – до так называемой точки нулевых перемещений, а второй участок – ниже этой точки. На участке ниже точки нулевых перемещений коэффициент постели принят постоянным, а выше описывается степенной зависимостью:

$$C = C_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)^n, \quad (1)$$

где: C_0 – значение коэффициента постели ниже точки нулевых перемещений,

n – эмпирический параметр, характеризующий степень развития пластических деформаций в грунте, причем $n \geq 0$,

z_0 – расстояние от поверхности грунта до точки нулевых перемещений.

Решая численным методом дифференциальное уравнение изогнутой оси сваи в верхней ее части и аналогичное уравнение в нижней части по известным формулам, автор получает выражение для определения всех необходимых величин u_z , φ_z , M_z , Q_z , σ_z .

Лучковский И.Я. и Лекумович Г.С. предложили модель, сочетающую трапецеидальное и постоянное распределение коэффициентов постели по глубине сваи [9].

Лундин Л.Ш. и Рабинович Е.А. [7] разработали нелинейную модель расчета горизонтально нагруженной сваи, в которой коэффициент постели изменяется с глубиной по закону степенной функции, при этом показатель степени n зависит от величины внешней нагрузки и в более общем случае от перемещения сваи на уровне поверхности грунта, т.е. $n = f(y_0)$.

Решение в рядах для параболических форм эпюры коэффициента постели дали Н.К. Снитко и А.Н. Снитко [17].

Учет предельного состояния системы «свая-грунт» с образованием шарнира пластичности рассмотрен в работах И.Я. Лучковского и Г.С. Лекумовича [8], [11]. При этом грунт моделируется Винклеровым основанием с коэффициентом постели, изменяющимся по закону треугольника для несвязных грунтов и закону трапеции для связных.

Б.Н. Жемочкин [2] предложил методику расчета стержня, заделанного в упругое полупространство. Этот метод может иметь место при расчете свай в очень плотных однородных грунтах при малых перемещениях свай. Эпюра реактивных отпоров в этой модели противоречит данным экспериментальных исследований, т.к. по Б.Н. Жемочкину максимальный отпор имеет место на уровне поверхности грунта.

Таким образом нет единого мнения по вопросу о том, как изменяется величина коэффициента постели с глубиной. Наибольшее распространение получили методы расчета свай, основанные на линейном возрастании коэффициента постели по глубине.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выявить наиболее достоверную модель грунтовой среды, более достоверно описывающей ее взаимодействие с поперечно нагруженной свайей, и разработать методику расчета системы «свая-грунт».

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- анализ существующих расчетных моделей системы «горизонтально нагруженная свая-грунт» и экспериментальных лабораторных и натурных исследований;
- создание новой расчетной модели изгиба поперечно нагруженной сваи в грунте и разработка аналитического и численного метода расчета;
- учет разнородности напластований грунтов основания;
- сравнения получаемых теоретических результатов с натурными экспериментами.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

1. Применение метода Б.Н. Жемочкина к расчету поперечно нагруженных свай при нелинейном распределении жесткости грунта по глубине заделки

1.1. Экспоненциальное распределение коэффициента постели

Для расчета сваи, погруженной в однородное или многослойное основание с нелинейным распределением коэффициента жесткости используем метод Б.Н. Жемочкина [2].

Порядок расчета заключается в следующем. Сваю длиной l разбиваем на равные участки; в серединах которых ставим жесткие опорные стержни, обеспечивающие контакт сваи с грунтом (рис. 1). Нагрузка на основание от каждого стержня принимается равномерно распределенной по площади $b \cdot \lambda$, где b – ширина сваи и λ – расстояние между стержнями.

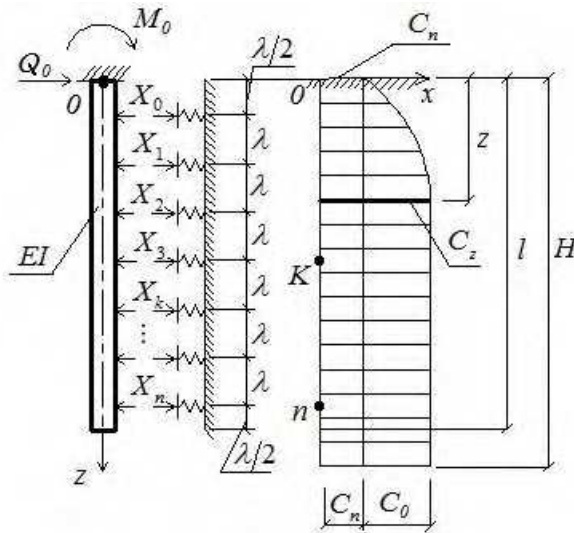


Рис. 1. Основная система расчетной модели
Fig. 1. The main system of calculation model

При произвольном распределении коэффициента постели в упругой стадии используется смешанный метод расчета, при котором принимаются условия равенства нулю суммы перемещений по направлению каждого неизвестного X_k :

$$X_0 \cdot \delta_{k0} + X_1 \cdot \delta_{k1} + X_2 \cdot \delta_{k2} + \dots + X_k \cdot \delta_{kk} + \dots + X_n \cdot \delta_{kn} - \omega_0 - a_k \cdot \varphi_0 + \Delta_{kp} = 0. \quad (2)$$

Кроме того, используются два уравнения равновесия. Одно выражает условие равенства «0» суммы изгибающих моментов всех сил относительно точки 0 равна нулю, а другое – равенство «0» суммы проекций всех сил на

горизонтальную ось x , параллельную этим силам равна нулю:

$$\left. \begin{aligned} X_0 + X_1 + X_2 + \dots + X_k + \dots + X_n - \sum Q = 0; \\ X_0 \cdot a_0 + X_1 \cdot a_1 + X_2 \cdot a_2 + \dots + X_k \cdot a_k + \dots + X_n \cdot a_n - \sum M = 0. \end{aligned} \right\} (3)$$

Единичные перемещения по направлению K от неизвестных реактивных сил X_i определяются как сумма деформации основания V_k в точке K и горизонтальных перемещений, вызванных изгибом сваи ω_{ki} :

$$\left. \begin{aligned} \delta_{ki} = V_{kk} + \omega_{ki}, \quad (\text{при } k=i) \\ \delta_{ki} = \omega_{ki}, \quad (\text{при } k \neq i) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где: ω_{ki} – функции Б.Н. Жемочкина [3], равные

$$\omega_{ki} = \frac{\lambda^3}{6EI} \overline{\omega_{ki}}, \quad (5)$$

где: $\overline{\omega_{ki}}$ – единичные деформации сваи в точке K от силы X_k , затабулированные в [3] и равные:

$$\overline{\omega_{ki}} = \left(\frac{a_k}{\lambda} \right)^2 \cdot \left(3 \frac{a_i}{\lambda} - \frac{a_k}{\lambda} \right); \quad (6)$$

где: λ – шаг опорных стержней, м;

a_i – расстояние от условного защемления до стержня i , м.

Осадка основания в точке K вызвана только реактивной силой X_k , а потому единичное перемещение постели $\overline{V_{kk}}$ равно:

$$\overline{V_{kk}} = \frac{1}{\lambda \cdot b \cdot C_k}, \quad (7)$$

где: b – ширина сечения сваи, м;

C_k – коэффициент жесткости в точке K , тс/м³;

Поэтому первое равенство (4) можно записать в виде:

$$\delta_{kk} = \frac{\lambda^3}{6EI} (\gamma_k + \overline{\omega_{kk}}) \quad (8)$$

где:

$$\gamma_k = \frac{6EI}{b \cdot C_k \cdot \lambda^4}. \quad (9)$$

Грузовые перемещения от внешних сил представим в виде:

$$\Delta_{kp} = \frac{\lambda^3}{6EI} Q_0 \cdot \overline{w_{ki}}. \quad (10)$$

Тогда система канонических уравнений запишется следующим образом:

$$A \cdot \begin{pmatrix} X_0 \\ X_1 \\ \dots \\ X_n \\ \omega_0 \\ \varphi_0' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\Delta_{0p} \\ -\Delta_{1p} \\ \dots \\ -\Delta_{np} \\ \Sigma Q \\ \Sigma M/\lambda \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где: A – квадратная матрица:

$$A = \begin{pmatrix} \delta_{00} & \delta_{01} & \dots & \delta_{0n} & 1 & a_0 \\ \delta_{11} & \delta_{12} & \dots & \delta_{1n} & 1 & a_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta_{n0} & \delta_{n1} & \dots & \delta_{nn} & 1 & a_n \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 \\ a_0 & a_1 & \dots & a_n & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Отметим, что получаемые из решения системы (12) значения ω_0 и φ_0' увеличены в $\frac{6EI}{\lambda^3}$ раз.

Представим закономерность изменения коэффициента постели вдоль оси сваи следующим образом (рис. 1):

$$C_z = C_n + C_0 \cdot (1 - e^{-a\bar{z}}) = C_n + C_0 \cdot (1 - e^{-a\bar{z}}), \quad (13)$$

где: C_z – коэффициент постели на произвольной глубине z , тс/м³,

C_n – коэффициент постели на уровне поверхности грунта, тс/м³,

C_0 – некоторая постоянная величина коэффициента постели на глубине H , тс/м³,

a – параметр, зависящий от перемещений сваи и характеризующий степень развития пластических деформаций в грунте, причем $a > 0$,

l – длина заглубленной части сваи, м;

z – расстояние от поверхности грунта до данного сечения сваи, м,

\bar{z} – приведенная (безразмерная) глубина поперечного сечения сваи:

$$\bar{a} \cdot z = \frac{a}{l} \cdot z = \bar{a} \cdot \frac{z}{l} = a \cdot \bar{z},$$

Выражение (13) можно записать в виде:

$$C_z = C_0 \left[\frac{C_n}{C_0} + (1 - e^{-a\bar{z}}) \right]. \quad (13-1)$$

Обозначим:

$$\frac{C_n}{C_0} = \bar{C}_n; \quad \frac{z}{l} = \bar{z}; \quad \lambda = \frac{l}{n}. \quad (14)$$

Запишем по методу Б.Н. Жемочкина единичные перемещения:

$$\delta_{kk} = \frac{\lambda^3}{6EI} \omega_{kk} + \frac{1}{\lambda \cdot b_p \cdot C_0 \left[\bar{C}_n + (1 - e^{-a\bar{z}}) \right]} \quad (15)$$

что приводится к виду:

$$\delta_{kk} = \frac{\lambda^3}{6EI} \left[\omega_{kk} + \frac{6EI}{\lambda^4 \cdot b_p \cdot C_0 \left[\bar{C}_n + (1 - e^{-a\bar{z}}) \right]} \right]. \quad (16)$$

Обозначив:

$$\mu_n = \frac{1}{\lambda^4} \sqrt{\frac{6EI}{b_p \cdot C_0}},$$

запишем второй член выражения (16) с учетом условий (14):

$$\frac{6EI}{\lambda^4 \cdot b_p \cdot C_0 \left[\bar{C}_n + (1 - e^{-a\bar{z}}) \right]} = \mu_n^4 \cdot \frac{1}{\left[\bar{C}_n + 1 - e^{-\frac{a\bar{k}}{n}} \right]}. \quad (17)$$

Подставив (17) в (16) при $n=10$, получим:

$$\delta_{kk} = \frac{\lambda^3}{6EI} \left[\omega_{kk} + \frac{\mu_n^4}{\left[\bar{C}_n - e^{-\frac{a\bar{k}}{10}} + 1 \right]} \right]. \quad (18)$$

1.2. Экспоненциальное распределение коэффициента постели при $\bar{C}_n=0$ (рис. 2)

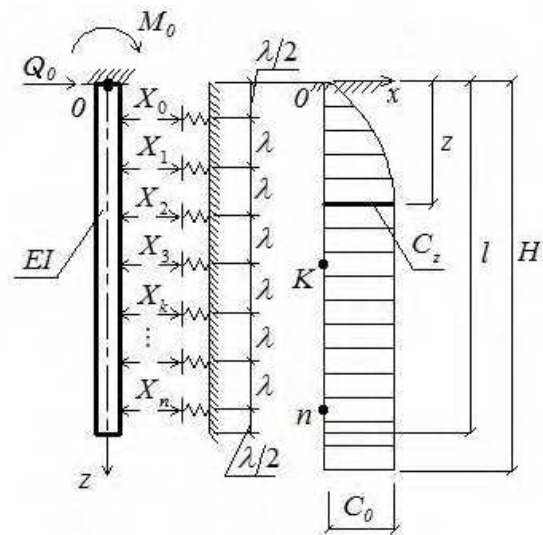


Рис. 2. Основная система и экспоненциальная эпюра коэффициента постели расчетной модели при $\bar{C}_n=0$

Fig. 2. The main system and the exponential curve deformation coefficient of calculation model with $\bar{C}_n=0$

По результатам расчетов, исходя из наиболее используемых геометрических и прочностных характеристик свай, составлены таблицы для прямого определения единичных сил X_k , горизонтальных перемещений y_0 и изгибающих моментов по глубине заделки M_z .

Таблицы не приведены в данной статье в силу ограниченности объемов представляемого материала. Для расчета свай на действие горизонтальной силы и изгибающего момента таблицы составлены отдельные. Следует учесть, что предлагаемая модель позволяет производить учет поперечной распределенной нагрузки q , которая включается в уравнения равновесия как сумма горизонтальных сил $\sum Q$ и изгибающих моментов $\sum M$ относительно точки условного заземления «0» в виде:

$$\left. \begin{aligned} \sum Q &= q \cdot b \cdot l, \\ \sum M &= \frac{q \cdot b \cdot l^2}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Немаловажно, что нормативной методикой [14] предусмотрено приведение неоднородного основания к условно однородному в связи со сложностями расчета. Предлагаемый же метод расчета свай, позволяет получить решение с учетом многослойного основания, подставляя в (9) значение коэффициента жесткости C_k в точке K .

2. Экспериментальные исследования работы свай на горизонтальную нагрузку

Основной задачей экспериментальных исследований установление характера распределения контактных напряжений, а также деформаций ствола свай при различных жесткостях свай.

Для этого в процессе нагружения измерялись перемещения тела свай на уровне поверхности грунта, и в грунте на разных глубинах. Одновременно с перемещениями определялись величины давлений возникающих на контакте системы «свая-грунт».

2.1. Результаты экспериментов с модельными сваями

С целью получения экспериментальных результатов по заявленной теме были изготовлены металлические сварные лотки 500x520x100 (мм) и 750x730x100 (мм) из листовой стали для свай длиной 555, 600 и 750 (мм).

Для нагружения свай использованы стандартные металлические гири массой: 50; 100; 200; 500; 1000 (г) и специально изготовленные разновесы.

Передача горизонтальных усилий на головы свай от вертикально подвешенного набора разновесов осуществлялась с помощью жестких металлических Г-образных шарнирных рычагов.

Сваи изготовлены из литого поликарбоната, основные физические и механические характеристики поликарбоната подтвержденные сертификатом качества:

плотность – $1.3 \pm 0.15 \text{ г/см}^3$;

прочность при растяжении (ГОСТ 11262-80) – 60-67 МПа;

модуль упругости при растяжении (ГОСТ 9550-80) – 2000 МПа;

относительное удлинение при разрыве не менее (ГОСТ 11262-80) – 30%;

водопоглощение, % по массе не более (ГОСТ 4650-80) – 0.37.

Во всех опытах использовался один и тот же песок Безлюдовского карьера Харьковской области (Украина) естественной влажности.

Для измерения горизонтальных перемещений в боковых панелях лотков сварены металлические втулки с диаметром отверстий 2 мм. Через втулки до боковой поверхности свай установлены металлические стержни диаметром 1.5 мм.

Измерение горизонтальных перемещений стержней (датчиков перемещений) определялось электронными индикаторами (микрометрами) фирмы «Sigma» с автономными источниками электропитания. Результаты измерений этих приборов выводились на автономные жидкокристаллические дисплеи с интервалом в одну сотую миллиметра. Гарантированная производителем погрешность этих приборов – 0.02 мм, т.е. в диапазоне перемещений 3-30 мм погрешность измерений не превышала 0.5 %.

Измерения давлений, возникавших на контакте «свая-грунт», производились с помощью тензорезисторных датчиков.

Датчики давления представляют собой пластины из упругой нержавеющей стали, материал и размеры которых были определены под возможное максимальное давление грунта, допустимые деформации тензорезисторов, после нагружения при величине их прогибов < 2.5 мм.

На рис. 3 и 4 показаны графики зависимости $y_0=f(Q)$, эпюры горизонтальных перемещений $y_z=f(Q)$, изгибающих моментов $M_z=f(Q)$, отпора грунта $\sigma_z=f(Q)$ в функции от внешней нагрузки для горизонтально нагруженной свай размерами 495x40x24 (мм). Эти сваи относятся к категории жестких (коротких) $\bar{l}=\alpha_n \cdot H=2.6$.

Как видно по рис. 3 и 4, предлагаемая модель основания с использованием экспоненциальной эпюры распределения коэффициента жесткости по глубине, позволяет более точно по сравнению с нормативной методикой описать напряженно-деформированное состояние горизонтально нагруженной свай. Сопоставление теоретических

данных с экспериментом показывает, что при малых нагрузках наблюдается практически полное совпадение с экспериментом: разница горизонтальных перемещений в уровне грунта составляет < 5%, величины изгибающих моментов по предлагаемому методу отличаются от экспериментальных данных на 10%, а по нормативному на 20%.

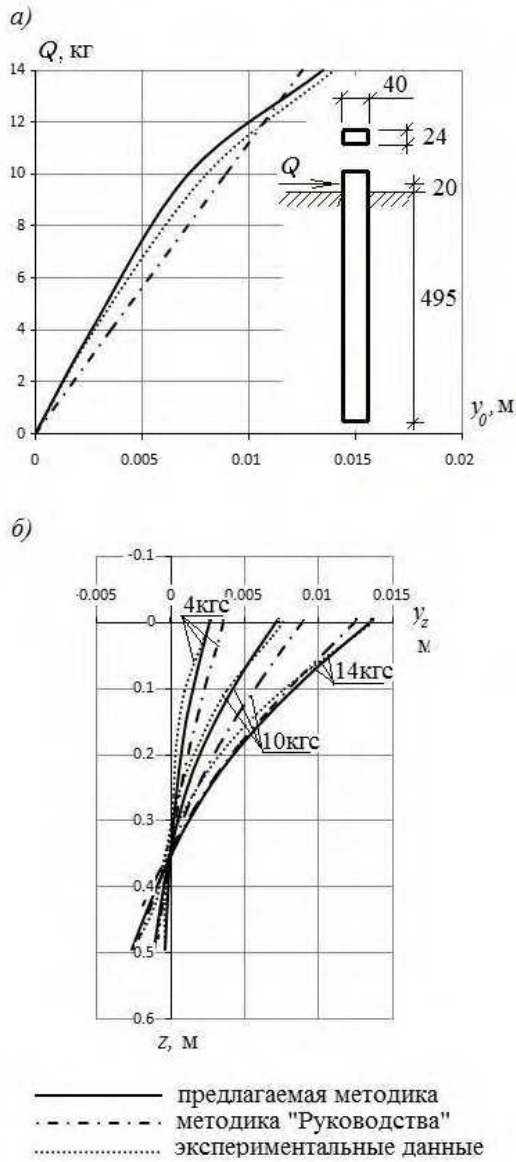


Рис. 3. Сравнение теоретических и экспериментальных данных (модельные сваи); а) графики зависимости $y_0=f(Q)$; б) эпюры горизонтальных перемещений от внешней нагрузки $y_z=f(Q)$

Fig. 3. Comparison of theoretical and experimental data (model piles); а) diagrams of dependence $y_0=f(Q)$; б) diagrams horizontal displacements of the external load $y_z=f(Q)$

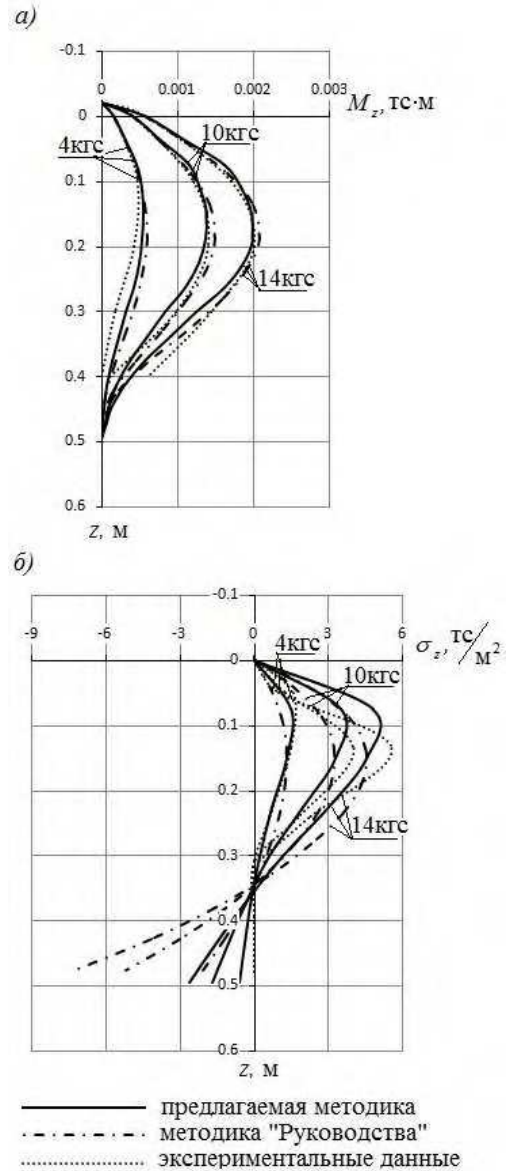


Рис. 4. Сравнение теоретических и экспериментальных данных (модельные сваи); а) эпюры изгибающих моментов $M_z=f(Q)$; б) эпюры отпора грунта в функции от внешней нагрузки $\sigma_z=f(Q)$

Fig. 4. Comparison of theoretical and experimental data (model piles); а) diagrams of bending moment $M_z=f(Q)$; б) diagrams soil resistance as a function of the external load $\sigma_z=f(Q)$

2.2. Натурные испытания свай

Экспериментальная площадка находилась на территории Салтовского массива г.Харькова (Украина). Размеры площадки в плане 30x30 м.

Грунты основания сложены покровными желто-бурыми суглинками, переходящими в красно-бурые, карбонатными на глубине 4.5-5.0 м. Суглинки подстилает слой супеси с прослойками

мелкозернистого песка, пластичной консистенции. Грунтовые воды на глубине 14 м не встречены.

Испытания натуральных и крупномасштабных моделей свай проведены лабораторией фундаментов и подземных сооружений Харьковского Промстройинипроекта (Украина) А.Н. Довгим и Г.С. Лекумовичем под руководством И.Я. Лучковского [8].

Металлические сваи были изготовлены из двух швеллеров № 12 длиной 3м, сваренные в коробчатое сечение. При испытании свай на чистый изгиб жесткость сваи составила $B_0=671.0\text{кН}\cdot\text{м}^2$, модуль упругости металла $E_a=2.06\cdot 10^5\text{МН}/\text{м}^2$.

Тензорезисторы наклеивались на внутреннюю грань швеллера по схеме полумоста.

Измерения перемещений тела сваи в грунте производились через шурфы глубиной 1.2 м.

На рис. 5 и 6 приведены эпюры $y_0=f(Q)$, $y_z=f(Q)$ и $M_z=f(Q)$.

Анализ этих графиков показывает, что принятая расчетная модель в случае металлической сваи, т.е. упругой, когда нелинейность зависимости $y_0=f(Q)$ связана только с неупругой работой основания, хорошо описывает действительную работу системы «свая-грунт». Сопоставление экспериментальных данных с теоретическими, полученными по нормативной методике, показывает недостатки последней, что особенно заметно при нагрузках, соответствующих перемещению в уровне поверхности грунта более 1 см. Изгибающие моменты, определенные по нормативной методике, превосходят действительные, а при больших нагрузках, наоборот – меньше экспериментальных.

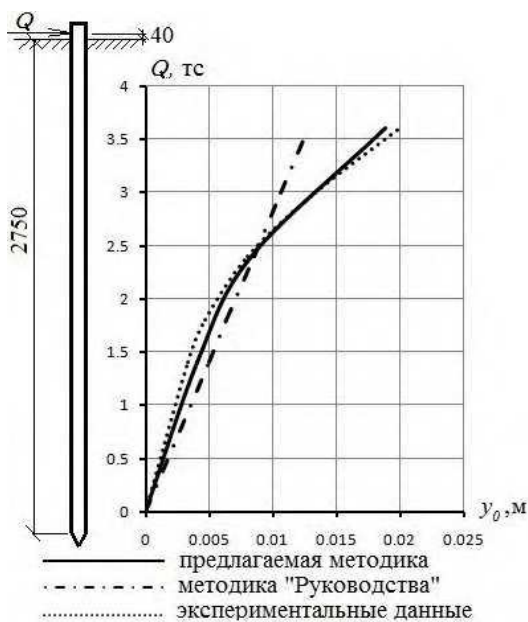


Рис. 5. Сравнения теоретических и экспериментальных данных (металлические сваи).

Графики зависимости $y_0=f(Q)$

Fig. 5. Comparison of theoretical and experimental data (metal piles). Diagrams of dependence $y_0=f(Q)$

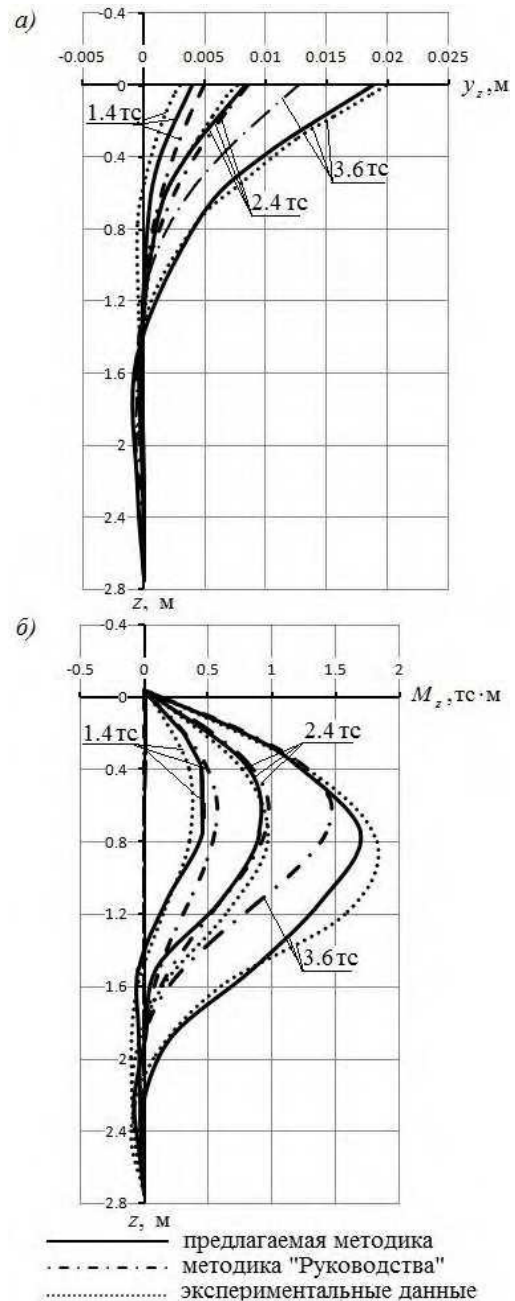


Рис. 6. Сравнения теоретических и экспериментальных данных (металлические сваи); а) эпюры горизонтальных перемещений $y_z=f(Q)$, б) эпюры изгибающих моментов $M_z=f(Q)$

Fig. 6. Comparison of theoretical and experimental data (metal piles); а) diagrams horizontal displacements $y_z=f(Q)$; б) diagrams of bending moment $M_z=f(Q)$

Максимальные изгибающие моменты по предлагаемой методике отличаются от экспериментальных данных менее чем на 20%, тогда как по нормативной методике значения отличаются на 30%. При рассмотрении графиков $y_0=f(Q)$, представленных на рис. 5, можно отметить, что предлагаемый метод лучше описывает экспериментальные данные, чем нормативная методика.

ВЫВОДЫ

1. Предлагаемый метод позволяет более достоверно производить расчет поперечно нагруженных свай в неоднородном основании.
2. Применение предлагаемой расчетной модели позволяет с использованием затабулированных функций существенно упростить решение задач с экспоненциальной эпюрой распределения коэффициента жесткости основания по глубине.
3. Точность разработанного метода подтверждена совпадением получаемых результатов расчета с численными решениями в ПК «SCAD».
4. Сопоставление теоретических данных с экспериментом показывает, что предлагаемая модель основания, позволяет более точно по сравнению с нормативной методикой описать напряженно-деформированное состояние горизонтально нагруженной сваи.

ЛИТЕРАТУРА

1. ДБН В.2.1-10-2009. Зміна №1. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. – 57 с.
2. Жемочкин Б.Н., 1948. Расчет упругой заделки стержня – М.:Стройиздат. – 69 с.
3. Жемочкин Б.Н., Сеницын А.П., 1962. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании. – М.:Госстройиздат. – 239 с.
4. Завриев К.С., Крюков Е.П., Шпиро Г.С., 1960. Исследование несущей способности фундаментов опор контактной сети. – Труды ВНИИСТ. – Москва. – Вып. 39. – С. 23-31.
5. Завриев К.С., Шпиро Г.С., 1970. Расчет фундаментов мостов глубокого заложения. – М.:Транспорт. – 214 с.
6. Куликов Г., Казьмина А., Кондратьева Н., 2011. Взаимосвязь предпроектных исследований и характера реконструкции жилища. MOTROL. – Commission of motorization and energetic in agriculture: Polish Academy of sciences. – Lublin. – ТОМ 13 С. – С. 145-149.
7. Лундин Л.Ш., Рабинович Е.А., 1976. О методике нелинейного расчета свайных ростверков на горизонтальную нагрузку. – Сборник ХПСНИИП «Расчет конструкций подземных сооружений». – Харьков. – С. 77-83.
8. Лучковский И.Я., 2000. Взаимодействие конструкций с основанием. – Х.:Изд-во ХГПУ. – 264 с.
9. Лучковский И.Я., Лекумович Г.С., 1971. К вопросу о расчете свай на горизонтальную нагрузку в связном грунте. – Основания, фундаменты и механика грунтов. – Москва. – № 3. – С. 17 – 19.
10. Лучковский И.Я., Лекумович Г.С., 1972. Расчет длинных свай на горизонтальную нагрузку. – Сб.

- "Межотраслевые вопросы строительства". ЦНИИС Госстроя СССР. – Москва. – № 11. – С. 25–29.
11. Лучковский И.Я., Лекумович Г.С., 1973. Стадии напряженно-деформированного состояния горизонтально нагруженных свай. Сб. Харьковского ПромстройНИИпроекта. – Москва. – С. 190 – 200.
 12. Миронов В.В., 1964. Некоторые вопросы методики и результаты экспериментального исследования работы свай на горизонтальные силы. – Труды ЛИИЖТ. – Ленинград. – Вып.203. – С. 20 – 32.
 13. Миронов В.В., 1973. О расчете свай конечной длины на горизонтальные нагрузки. – Основания, фундаменты и механика грунтов. – Москва. – № 1. – С. 3–6.
 14. Руководство по проектированию свайных фундаментов. НИИОСП им. Н.М. Герсееванова Госстроя СССР., 1980. – М.: Стройиздат. – 151 с.
 15. Силин К.С., Завриев К.С., 1962. Методика расчета фундаментов с вертикальными столбами. – Труды ВНИИСТ. – Москва. – Вып. 45. – С. 34-55.
 16. СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты, 1986. – М.: Госстрой СССР. – 45 с.
 17. Снитко А.Н., 1968. Расчет гибких опор в грунтовой среде с изменяющимся коэффициентом постели. – Основания, фундаменты и механика грунтов. – Москва. – № 2. – С. 65-72.
 18. Филатов А.В., Прохоров И.Я., Гуслистая Ж.В., 1978. Об эпюре изменения коэффициента постели при работе свай на моментные нагрузки. – Известия ВУЗов «Строительство и архитектура». – Москва. – № 12. – С. 52-54.
 19. Филатов А.В., 1977. Экспериментальные исследования эпюр реактивного давления грунта и перемещений свай при горизонтальных нагрузках. – Основания, фундаменты и механика грунтов. – Москва. – № 1. – С. 32-34.
 20. Шеменков Ю.М., Миткина Г.В., 1993. Экспериментальные исследования односвайных фундаментов. – Основания, фундаменты и механика грунтов. – Москва. – № 2. – С. 12-16.

EXPERIMENTAL REASONABLES OF MODEL HORIZONTALLY LOADED PILES WITH EXPONENTIALLY DISTRIBUTED STIFFNESS COEFFICIENT OF GROUNDS

Abstract. The paper considers proposed model a base for the calculation of horizontally loaded piles in a homogeneous or multi-layer basis with nonlinear soil stiffness coefficient distribution based on the method of B.N. Zhemochkin. An analysis of the stress-strain state of piles on several techniques and evaluation of their compliance and full-scale model tests.

Keywords: pile, horizontal load, soil stiffness coefficient distribution in depth

НАДЕЖНОСТЬ ВОДОПРОВОДНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБ УКРАИНЫ

Александр Матяш

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка
Адрес: Украина, 36011, г Полтава, Первомайский проспект, 24
E-mail: kanc@pntu.edu.ua

Аннотация. Водопроводные сети являются одним из главных и весомых элементов системы подачи и распределения воды, в связи с этим при их проектировании следует обязательно учитывать аспекты надежности трубопроводов. В статье установлены причины отказов, вычислено значение удельного параметра потока отказов и построены аналитические зависимости для металлических водопроводных труб четырех городов Украины.

Ключевые слова: водопроводные металлические трубы, показатели надежности, безотказность, ремонтпригодность.

ВВЕДЕНИЕ

На данном этапе развития систем подачи и распределения воды значительное внимание следует уделять именно надежности как отдельных элементов, так и системы водоснабжения в целом. Как показала практика эксплуатации систем водоснабжения, игнорирование вопросов надежности приводит к быстрому износу материала, росту количества аварий, повышению энергопотребления, что негативно отражается на работе водоканалов и существенно увеличивает количество нареканий населения на неудовлетворительное водоснабжение.

Одним из самых весомых элементов системы подачи и распределения воды на пути к потребителю являются водопроводные сети, порывы на которых оставляют значительное количество населения городов и населенных пунктов Украины без воды на время ликвидации аварии. Согласно постановлению Кабинета Министров Украины № 630 от 2005 [17], где требуется чтобы "...допустимый срок отклонения показателей с бесперебойного водоснабжения составлял не более 6 часов в сутки и не более 2 раз в месяц". ДБН В.2.5 – 74: 2013 говорит [6]: "...централизованные системы водоснабжения по надежности действия или по степени обеспеченности подачи воды подразделяют на три категории ...":

- для 1 категории допускается перерыв в подаче воды не более чем на 10 мин;
- для 2 категории допускается перерыв в подаче воды не более чем на 6 часов;
- для 3 категории допускается перерыв в подаче воды не более чем на 24 часа.

Нормы, указанные в нормативно-правовых документах, могут быть выполнены для системы подачи и распределения воды в случае соответствия требованиям надежности отдельных элементов системы водоснабжения, в том числе и водопроводных сетей.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Основы науки надежности в системе водоснабжения заложили ученые бывшего Советского Союза Н.Н. Абрамов (Московская школа) [1–5] и Ю.А. Ильин (Ленинградская школа)

[8 – 9]. В Украине значительный вклад в решение вопросов надежности внесли доктора технических наук, профессора В.Г. Новохатний [13, 15, 16], А.А.Ткачук [21], П.Д. Хоружый [23], А.Я. Найманов [14]. Среди специалистов в области водоснабжения следует отметить С.В. Храменкова (Мосводоканал), О.Г. Примина (Институт МосводоканалНДИпроект) [19, 24], Е.В.Кузенкова (ОАО "Липецкий металлургический завод "Свободный сокол") [11] и другие.

Для установления основных причин отказов, нахождения количественных и качественных показателей надежности водопроводных труб направляли и направляют свои усилия ряд украинских и зарубежных ученых, а именно: В.С.Макогонов [12], Н.А.Украинец [22], А.Д.Сабитов [20], Л.Д. Климиашвили [10], Н. Hotłoś, F. Piechurski, JR Rak, A. Studzinski, B. Tchórzewska-Cieślak [25–28]. Однако анализ научных источников показывает, что полученные числовые показатели надежности водопроводных трубопроводов требуют дополнительных исследований в каждом конкретном случае, поскольку на безотказность водопроводных сетей влияет ряд факторов как при проектировании, так и эксплуатации сетей.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для выполнения расчетов надежности, получения числовых значений, проведения сравнительного анализа и разработки рекомендаций по повышению надежности следует оперировать значениями безотказной работы отдельных элементов системы подачи и распределения воды. С этой целью были собраны и обработаны данные по безотказной работе водопроводных металлических труб четырех городов Украины, а именно: Полтавы, Луцка, Кременчуга и Карловки Полтавской области. На основе статистического анализа установлены количественные, качественные показатели надежности и построены аналитические зависимости удельного параметра потока отказов от диаметра труб.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Качественный анализ повреждений труб

Для выполнения анализа повреждений водопроводных труб были использованы материалы

"Водоканалов" областных центров четырех городов, где сведения об отказах элементов систем водоснабжения регистрируются в конце каждого дня мастерами соответствующих участков. Для анализа надежности труб участков водопроводных сетей были собраны и обработаны статистические данные городов Полтава, Кременчуг, Луцк и Карловка Полтавской области. Используются данные о повреждениях для металлических труб диаметром 100...500 мм за 4–6 лет (2003...2008 гг.). Перед объединением статистических данных в генеральную выборку выполнена проверка отдельных выборок на аномальность результатов наблюдения [18].

Система водоснабжения г. Полтава

Для того чтобы оценить безотказность труб участков водопроводной сети города Полтава были собраны и обработаны статистические данные для металлических труб диаметром 100...500 мм за 5 лет (2004...2008 гг.). Водопроводные сети города имеют протяженность более 630 км и состоят из чугунных (65%), стальных (33%) труб, незначительный процент составляют асбестоцементные и пластмассовые трубы (2%). Статистические данные по повреждениям металлических водопроводных труб на участках водопроводной сети г. Полтава приведены в таблице 1.

Таблица 1. Обобщенные статистические данные по повреждениям металлических труб г. Полтава

Table 1. Generalized statistics on damage metal pipes Poltava

Трубы участков сети	Диаметр D , мм	Общая длина проанализированных труб, L , км	Количество зафиксированных повреждений на участках сети, n
Чугунные (серый чугун)	100	29,26	427
	150	14,31	194
	200	12,67	122
	250	2,9	23
	300	2,77	19
	500	1,966	7
Стальные	100	11,4	218
	150	2,989	56
	200	3,763	69
	250	0,931	12
	300	0,897	11
	500	3,052	18

Анализ статистических данных позволил выделить основные виды повреждений для металлических водопроводных труб. Для чугунных труб это: выход цемента из раструбных соединений – 45%, поперечные переломы – 43%, коррозия – 10%, повреждения землеройной техникой – 2%. Для стальных труб: сквозные свищи – 48%, нарушение сварных соединений – 36%, коррозия – 14%, повреждения землеройной техникой – 2% и другие (рис. 1, 2).



Рис. 1. Виды повреждений чугунных водопроводных труб г. Полтава

Fig. 1. Types of defects of iron water pipes of Poltava city

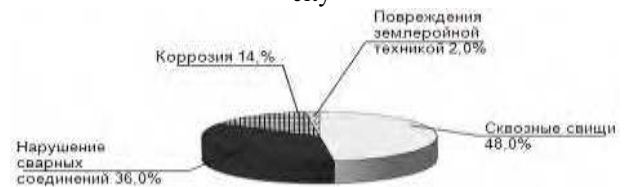


Рис. 2. Виды повреждений стальных водопроводных труб г. Полтава

Fig. 2. Types of defects of steel water pipes of Poltava city

Система водоснабжения г. Кременчуг Полтавской области

Для г. Кременчуг Полтавской области срок наблюдения металлических труб диаметром 50...400 мм составлял 5 лет (2004...2008 гг.). Общая протяженность водопроводной сети составляет около 424 км. Состоит она из чугунных (55%), стальных (41%), асбестоцементных и пластмассовых труб (4%). Статистические данные по повреждениям металлических водопроводных труб на участках водопроводной сети г. Кременчуг приведены в таблице 2.

Таблица 2. Обобщенные статистические данные по повреждениям металлических труб г. Кременчуг

Table 2. Generalized statistics on damage metal pipes Kremenchug town

Трубы участков сети	Диаметр D , мм	Общая длина проанализированных труб, L , км	Количество зафиксированных повреждений на участках сети, n
Чугунные (серый чугун)	50	0,980	29
	100	23,633	389
	150	14,538	150
	200	10,045	99
	250	11,681	72
	300	13,260	74
Стальные	50	3,1900	36
	100	14,303	142
	150	5,310	50
	200	3,921	34
	250	6,300	39
	300	7,180	28

Как показал качественный анализ, основными видами повреждений для чугунных труб являются: выход цемента из раструбных соединений – 68 %, поперечные переломы – 19%, коррозия – 9%, повреждения землеройной техникой – 4 %; для стальных труб: сквозные свищи – 71 %, нарушение

сварных соединений – 18%, коррозия – 7%, повреждения землеройной техникой – 4% (рис. 3, 4).

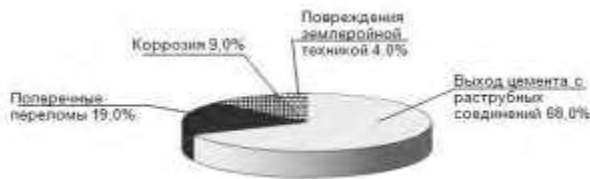


Рис. 3. Виды повреждений чугунных водопроводных труб г. Кременчуг
Fig. 3. Types of defects of iron water pipes of Kremenchug town

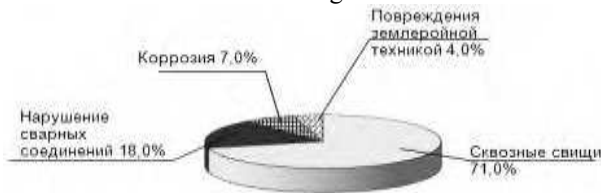


Рис. 4. Виды повреждений стальных водопроводных труб г. Кременчуг
Fig. 4. Types of defects of steel water pipes of Kremenchug town

Система водоснабжения г. Луцк

Водопроводная сеть г. Луцк состоит из чугунных (52%), стальных (38%) труб, незначительный процент составляют асбестоцементные и пластмассовые трубы (10%). Обобщенные статистические данные по отказам чугунных и стальных труб приведены в таблице 3.

Таблица 3. Обобщенные статистические данные по повреждениям металлических труб г. Луцк
Table 3. Generalized statistics on damage metal pipes Lutsk

Трубы участков сети	Диаметр D , мм	Общая длина проанализированных труб, L , км	Количество зафиксированных повреждений на участках сети, n
Чугунные (серый чугун)	100	19,222	288
	150	45,635	270
	200	30,087	72
	250	8,600	34
Стальные	300	41,355	28
	100	41,370	1075
	150	20,750	456
	200	12,850	160
	250	10,450	97
	300	20,889	59

Анализ статистических данных о повреждениях металлических труб диаметром 100...300мм за 4,5 лет (2004...2008 гг.) показал, что основными видами повреждений для чугунных труб являются: выход цемента с раструбов – 80,5%, поперечные переломы – 17,4%, коррозия – 1,4%, повреждения землеройной техникой – 0,7%; для стальных труб: сквозные свищи – 87,5%, нарушение сварных соединений – 11%, коррозия – 1%, повреждения землеройной техникой – 0,5% (рис. 5, 6).



Рис. 5. Виды повреждений чугунных водопроводных труб г. Луцк
Fig. 5. Types of defects of iron water pipes of Lutsk city

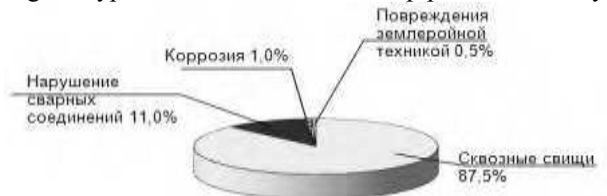


Рис. 6. Виды повреждений стальных водопроводных труб г. Луцк
Fig. 6. Types of defects of steel water pipes of Lutsk city

Система водоснабжения г. Карловка Полтавской области

Общая протяженность водопроводной сети г. Карловка составляет около 50 км. Проанализированы статистические данные о повреждениях металлических труб диаметром 50...300 мм за 7 лет (2002–2008 гг.). Стальные водопроводы составляют 61% от общей протяженности сетей, чугунные – 32%, 7% – это асбестоцементные трубы и трубы из полиэтилена. Обобщенные статистические данные об отказах чугунных и стальных труб приведены в таблице 4.

Таблица 4. Обобщенные статистические данные по отказам металлических труб г. Карловка
Table 4. Generalized statistics on damage metal pipes Karlivka

Трубы участков сети	Диаметр D , мм	Общая длина проанализированных труб, L , км	Количество зафиксированных повреждений на участках сети, n
Чугунные (серый чугун)	50	0,4	8
	100	3,904	51
	150	5,054	47
	200	2,824	22
	250	0,952	5
	300	3,075	14
Стальные	50	6,684	150
	76	1,902	33
	89	1,5	29
	100	9,265	177
	125	2,34	27
	150	2,344	35
	200	0,8	7
	250	5,542	47

Основными видами повреждений чугунных труб являются: выход цемента с раструбов (65%), поперечные переломы (23%), коррозия (8%), повреждения землеройной техникой (4%), стальные трубы – сквозные свищи (74%), нарушение сварных соединений (21%), коррозия (4%), повреждения

землеройной техникой (1%), что показано на рисунках 7 и 8.



Рис. 7 Виды повреждений чугунных водопроводных труб г. Карловка Полтавской области
Fig. 7. Types of defects of iron water pipes of Karlivka town, Poltava region

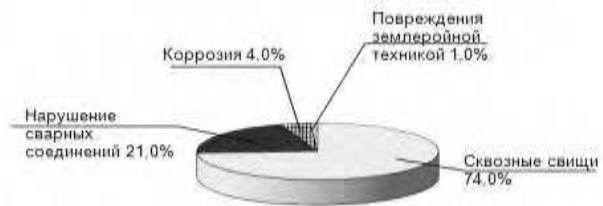


Рис. 8. Виды повреждений стальных водопроводных труб г. Карловка Полтавской области
Fig. 8. Types of defects of steel water pipes of Karlivka town, Poltava region

Количественный анализ повреждений труб. Система водоснабжения г. Полтава

В качестве основного показателя безотказности водопроводных труб принято наработка на отказ T 1 км трубопровода и обратной ему величины – параметр потока отказов ω_0 1 км трубопровода. Для расчета среднего значения параметра потока отказов 1 км трубопровода ω_0 использована следующая формула:

$$\omega_0 = n / (t \cdot \sum L), \quad (1)$$

где: n – количество отказов участка водопроводной сети; t – срок наблюдения; $\sum L$ – протяженность участков водопроводной сети соответствующего диаметра, км.

Специалистами по водоснабжению [24] принята статистическая гипотеза экспоненциального распределения параметра потока отказов ω_0 1 км трубопровода. Анализ статистических данных в исследуемых городах проводился в течение фиксированного времени, а полученные значения параметра потока отказов ω_0 были случайными. Интервальные оценки для параметра потока отказов, исчисленные в соответствии с [7] по формулам (табл. 5):

- нижняя интервальная оценка параметра потока отказов ω_0 :

$$\omega_0'' = \omega_0 / r_1; \quad (2)$$

- верхняя интервальная оценка параметра потока отказов ω_0

$$\omega_0' = \omega_0 / r_2, \quad (3)$$

где: r_1, r_2 – коэффициенты для определения интервальных оценок в случае экспоненциального распределения, принимаются по таблицам 6 и 7 [7]. Доверительная вероятность принята $\gamma = 0,95$.

Таблица 5. Расчет интервальных оценок для параметра потока отказов ω_0 г. Полтава

Table 5. Calculation interval estimates for the failure flow parameter ω_0 of Poltava city

Трубы участков сети	Диаметр D , мм	Объем выборки n	Параметр потока отказов ω_0 , 1/год·км:		
			среднее значение	интервальная оценка	
				нижняя	верхняя
Чугунные (серый чугун)	100	427	2,92	2,68	3,16
	150	194	2,71	2,40	3,05
	200	122	1,92	1,64	2,23
	250	23	1,58	1,07	2,24
	300	19	1,37	0,90	2,01
Стальные	100	218	3,81	3,37	4,26
	150	56	3,74	2,97	4,68
	200	69	3,66	2,98	4,46
	250	12	2,57	1,49	4,15
	300	11	2,45	1,38	4,08

Средневзвешенное значение параметра потока отказов ω_0 независимо от диаметра вычислено по формуле:

$$\omega_0^{mid} = \frac{\omega_{01}L_1 + \omega_{02}L_2 + \dots + \omega_{0n}L_n}{L_1 + L_2 + \dots + L_n}. \quad (4)$$

Средневзвешенное значение параметра потока отказов ω_0 , независимо от диаметра, для системы водоснабжения г. Полтава составляет:

– $\omega_0^{mid} = 2,54$ – для чугунных труб,

– $\omega_0^{mid} = 3,66$ – для стальных труб.

Система водоснабжения г. Кременчуг Полтавской области

Для выполнения количественного анализа статистических данных повреждений на сети водоснабжения города Кременчуг использована формула 1. Интервальные оценки вычислены по формулам 2 и 3 (табл. 6).

Таблица 6. Расчет интервальных оценок для параметра потока отказов ω_0 г. Кременчуг Полтавской области

Table 6. Calculation interval estimates for the failure flow parameter ω_0 of Kremenchug town

Трубы участков сети	Диаметр D , мм	Объем выборки n	Параметр потока отказов ω_0 , 1/год·км:		
			среднее значение	интервальная оценка	
				нижняя	верхняя
Чугунные (серый чугун)	50	29	4,93	3,52	6,66
	100	389	2,74	2,52	2,99
	150	150	1,72	1,50	1,98
	200	99	1,64	1,38	1,93
	250	72	1,03	0,84	1,25
Стальные	300	74	0,93	0,76	1,13
	50	36	1,88	1,41	2,49
	100	142	1,65	1,43	1,91
	150	50	1,57	1,23	1,99
	200	34	1,45	1,07	1,91
Стальные	250	39	1,03	0,78	1,34
	300	28	0,65	0,46	0,88

Средневзвешенное значение параметра потока отказов ω_0 , независимо от диаметра, для системы водоснабжения г. Кременчуг составляет:

- $\omega_0^{mid} = 1,83$ – для чугунных труб,
- $\omega_0^{mid} = 1,36$ – для стальных труб.

Система водоснабжения г. Луцк

Для количественного анализа статистических данных повреждений на сети водоснабжения города Луцк использованы формула 1, интервальные оценки вычислены по формулам 2 и 3 (табл. 7).

Таблица 7. Расчет интервальных оценок для параметра потока отказов ω_0 г. Луцк

Table 7. Calculation interval estimates for the failure flow parameter ω_0 of Lutsk city

Трубы участков сети	Диаметр D, мм	Объем выборки n	Параметр потока отказов ω_0 , 1/год·км:		
			среднее значение	интервальная оценка	
				нижняя	верхняя
Чугунные (серый чугун)	100	288	3,330	3,03	3,67
	150	270	1,315	1,19	1,45
	200	72	0,532	0,43	0,65
	250	34	0,879	0,65	1,17
	300	28	0,150	0,11	0,21
Стальные	100	1075	5,77	5,50	6,08
	150	456	4,88	4,59	5,20
	200	160	2,77	2,41	3,16
	250	97	2,06	1,73	2,43
	300	59	0,63	0,50	0,77

Средневзвешенное значение параметра потока отказов ω_0 , независимо от диаметра, для системы водоснабжения г. Луцк составляет:

- $\omega_0^{mid} = 1,06$ – для чугунных труб,
- $\omega_0^{mid} = 3,86$ – для стальных труб.

Система водоснабжения г. Карловка Полтавской области

Результаты расчетов средних значений и интервальных оценок для параметра потока отказов ω_0 г. Карловка приведены в таблице 8.

Средневзвешенное значение параметра потока отказов ω_0 г. Карловка составляет:

- $\omega_0^{mid} = 1,33$ – для чугунных труб,
- $\omega_0^{mid} = 2,42$ – для стальных труб.

Аналитические зависимости для оценки безотказности водопроводных труб.

Система водоснабжения г. Полтава

Как показал анализ статистических данных (табл. 1–4), параметр потока отказов металлических труб уменьшается с увеличением диаметра. Это дало возможность оценить и спрогнозировать уровень надежности металлических водопроводных труб в зависимости от диаметра.

В результате математической обработки статистических данных получены аналитические зависимости параметра потока отказов ω_0 от диаметра труб. Построение аналитических функций

на основе эмпирических данных выполнено с помощью электронных таблиц "Microsoft Excel SR-1" по программе Table Curve (рис. 9, 10).

Таблица 8. Расчет интервальных оценок для параметра потока отказов ω_0 г. Карловка Полтавской области

Table 8. Calculation interval estimates for the failure flow parameter ω_0 of Karlivka town, Poltava region

Трубы участков сети	Диаметр D, мм	Объем выборки n	Параметр потока отказов ω_0 , 1/год·км:		
			среднее значение	интервальная оценка	
				нижняя	верхняя
Чугунные (серый чугун)	50	0,4	2,94	2,10	2,94
	100	3,904	1,92	1,76	1,92
	150	5,054	1,37	1,19	1,37
	200	2,824	1,15	0,96	1,15
	250	0,952	0,77	0,63	0,77
Стальные	300	3,075	0,67	0,55	0,67
	50	6,684	3,30	2,36	4,71
	76	1,902	2,55	1,64	3,19
	89	1,5	2,84	2,14	3,77
	100	9,265	2,81	2,51	3,12
	125	2,34	1,70	1,46	1,95
	150	2,344	2,20	1,72	2,78
	200	0,8	1,29	0,95	1,70
	250	5,542	1,25	0,94	1,62
300	0,462	0,64	0,45	0,86	



Рис. 9. Аналитическая зависимость $\omega_0 = f(D)$ для чугунных труб г. Полтава

Fig. 9. Analytical dependence $\omega_0 = f(D)$ for iron pipes of Poltava city

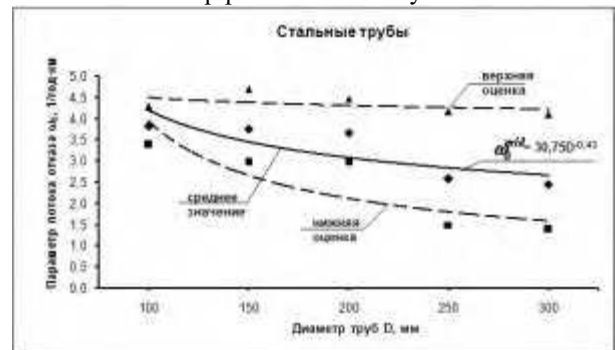


Рис. 10. Аналитическая зависимость $\omega_0 = f(D)$ для стальных труб г. Полтава

Fig. 10. Analytical dependence $\omega_0 = f(D)$ for steel pipes of Poltava city

Система водоснабжения г. Кременчуг Полтавской области

Для системы водоснабжения г. Кременчуг также получены аналитические функции для средних значений параметра потока отказов ω_0^{mid} (рис. 11, 12).



Рис. 11. Аналитическая зависимость $\omega_0 = f(D)$ для чугунных труб г. Кременчуг Полтавской области
Fig. 11. Analytical dependence $\omega_0 = f(D)$ for iron pipes of Kremenchug town, Poltava region



Рис. 12. Аналитическая зависимость $\omega_0 = f(D)$ для стальных труб г. Кременчуг Полтавской области
Fig. 12. Analytical dependence $\omega_0 = f(D)$ for steel pipes of Kremenchug town, Poltava region

Система водоснабжения г. Луцк

Полученные аналитические функции для средних значений параметра потока отказов сети водоснабжения г. Луцк изображены на графиках (рис. 13, 14).



Рис. 13. Аналитическая зависимость $\omega_0 = f(D)$ для чугунных труб г. Луцк
Fig. 13. Analytical dependence $\omega_0 = f(D)$ for iron pipes of Lutsk city

Система водоснабжения г. Карловка Полтавской области

Для системы водоснабжения города Карловка также установлены аналитические зависимости параметра потока отказов от диаметра труб. Полученные аналитические функции для средних значений параметра потока отказов для сети водоснабжения г. Карловка показаны на графиках (рис. 15, 16).



Рис. 14. Аналитическая зависимость $\omega_0 = f(D)$ для стальных труб г. Луцк
Fig. 14. Analytical dependence $\omega_0 = f(D)$ for steel pipes of Lutsk city



Рис. 15. Аналитическая зависимость $\omega_0 = f(D)$ для чугунных труб г. Карловка Полтавской области
Fig. 15. Analytical dependence $\omega_0 = f(D)$ for iron pipes of Karlivka town, Poltava region

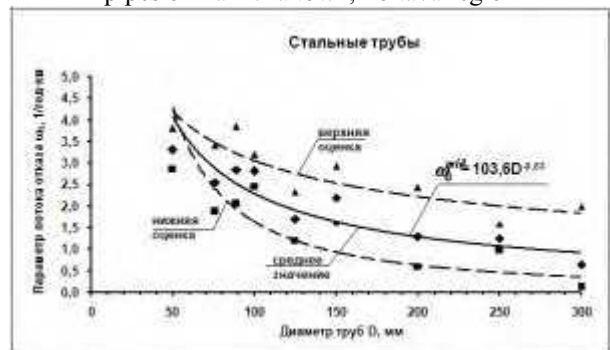


Рис. 16. Аналитическая зависимость $\omega_0 = f(D)$ для стальных труб г. Карловка Полтавской области
Fig. 16. Analytical dependence $\omega_0 = f(D)$ for steel pipes of Karlivka town, Poltava region

Обобщенный качественный анализ повреждений труб

На основе выполненного анализа повреждений водопроводных металлических труб рассчитаны средние значения причин повреждений, которые приведены на соответствующих диаграммах (рис. 17, 18).



Рис. 17. Виды повреждений чугунных водопроводных труб для четырех городов Украины
Fig. 17. Types of defects of iron pipes of four cities of Ukraine

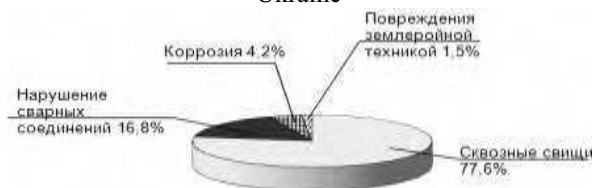


Рис. 18. Виды повреждений стальных водопроводных труб для четырех городов Украины
Fig. 18. Types of defects of steel pipes of four cities of Ukraine

Обобщенный количественный анализ повреждений труб

Для четырех городов Украины (Полтава, Кременчуг, Луцк и Карловка) рассчитаны средние значения параметра потока отказов и интервальные оценки для чугунных (серый чугун) и стальных труб (табл. 9).

Таблица 9

Обобщенные значения параметра потока отказов металлических труб для четырех городов Украины
Table 9
Generalized parameter failure flow of metal pipes for four Ukrainian cities

Группы участков	Диаметр D, мм	Параметр потока отказов ω_0 , 1/год·км:		
		среднее значение	интервальная оценка	
			нижняя	верхняя
Чугунные (серый чугун)	50	4,47	3,39	5,80
	100	2,53	2,41	2,67
	150	1,39	1,29	1,47
	200	0,94	0,86	1,04
	250	0,93	0,79	1,08
Стальные	50	3,14	2,75	3,57
	100	3,71	3,53	3,90
	150	3,17	2,96	3,37
	200	2,11	1,88	2,32
	250	1,40	1,24	1,57
	300	0,57	0,48	0,67

Обобщенные аналитические зависимости для оценки безотказности металлических водопроводных труб

Получены аналитические функции средних значений параметра потока отказов для сети водоснабжения исследуемых городов. Графики

построенных аналитических зависимостей – на рисунках 19 и 20.

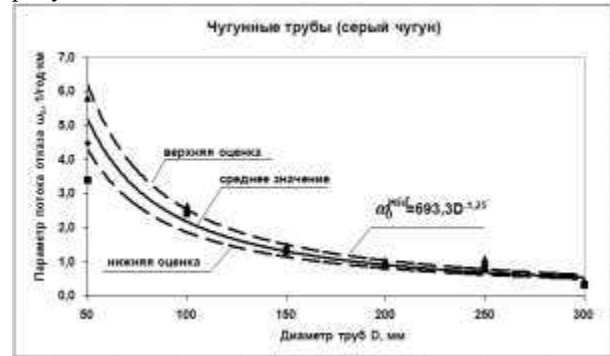


Рис. 19. Аналитическая зависимость $\omega_0 = f(D)$ для чугунных труб (обобщенная для 4-х городов Украины)

Fig. 19. Analytical dependence $\omega_0 = f(D)$ for iron pipes (summarized) of four cities of Ukraine

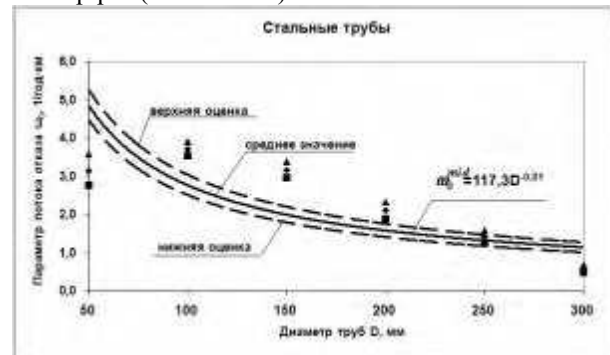


Рис. 20. Аналитическая зависимость $\omega_0 = f(D)$ для стальных труб (обобщенная для 4-х городов Украины)

Fig. 20. Analytical dependence $\omega_0 = f(D)$ for steel pipes (summarized) of four cities of Ukraine

ВЫВОДЫ

Методами математической статистики выполнен углубленный анализ данных эксплуатации по отказам металлических водопроводных труб. Таким образом, проведено дополнительное обоснование и подтверждение для городов Украины известного факта, что с увеличением диаметра металлических труб параметр потока отказов уменьшается.

Обобщенные средние значения удельного параметра потока отказов ω_0^{mid} , независимо от диаметра, для четырех городов Украины составляют:

– для чугунных труб $\omega_0^{mid} = 1,37$ 1/год·км,

– для стальных труб $\omega_0^{mid} = 2,64$ 1/год·км.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Н., 1974. О проблемах надежности систем водоснабжения // Водные ресурсы. – №2. – 114 – 119.
2. Абрамов Н., 1979. Надежность систем водоснабжения. – М.: Стройиздат. – 231.
3. Абрамов Н., 1982. Водоснабжение: [учебник]. – М.: Стройиздат. – 440.

4. Абрамов Н., 1984. Надежность систем водоснабжения. – М.: Стройиздат. – 216.
5. Абрамов Н., Малов В., 1976. О надежности систем водоснабжения и путях ее обеспечения // Известия АН СРСР. Энергетика и транспорт. – №1. – 161 – 176.
6. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування: ДБН В.2.5-74:2013 – [Чинний від 2014-01-01]. — К. : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. – 281. – (Національні стандарти України).
7. ГОСТ 11.005-74 Прикладная статистика Правила определения оценок и доверительных границ для параметров экспоненциального распределения и распределения Пуассона. / М.: Издательство стандартов, 1974. – 29.
8. Ильин Ю., 1985. Надежность водопроводных сооружений и оборудования. – М.: Стройиздат. – 240.
9. Ильин Ю., 1987. Расчет надежности подачи воды. – М.: Стройиздат. – 320.
10. Климиашвили Л., 1978. Исследование надежности и методов оптимального резервирования систем транспортирования воды: автореф. дис. канд. техн. наук. – М.: МИСИ– 22.
11. Кузенков Е., 2004. Обеспечение надежности, долговечности и экологической безопасности сетей водоснабжения // Водоснабжение и санитарная техника. – №11. – 33 – 37.
12. Макогонов В., Эренбург Э., 1973. Показатели надежности системы водоснабжения / Проблемы надежности систем водоснабжения. – М.: Московский ордена Трудового Красного Знамени инженерно-строительный институт им. В.В. Куйбышева. – 29 – 34.
13. Матяш О., Новохатній В., 2010. Аналіз безвідмовності водопровідних металевих труб за статистичними даними.– Проблеми водопостачання, водовідведення і гідравліки: Науково-технічний збірник. – Вип. 14. – К.: КНУБА. – 56 – 64.
14. Найманов А., 2005. О надежности систем водоснабжения и водоотведения // Водоснабжение и санитарная техника.– №7. – 30 – 35.
15. Новохатній В., 2012. Надійність функціонування подавально-розподільного комплексу систем водопостачання: автореф. дис. докт. техн. наук. – К.: КНУБА. – 32.
16. Новохатній В., Костенко С., 2013. Надежность водоводов систем водоснабжения. MOTROL. — Commission of motorization and energetics in agriculture : Polish Academy of sciences. — Lublin. — Vol. 12C. — 114—122.
17. Правила надання послуг з централізованого опалення, постачання холодної та гарячої води і водовідведення / Постанова Кабінету Міністрів України від 21 липня 2005р. №630.
18. Прикладная статистика. Правила оценки аномальности результатов наблюдений. ГОСТ 11.002-73. – М.: Издательство стандартов, 1973.–24.
19. Примин О., Орлов В., 2008. Методы оценки пропускной способности действующих напорных трубопроводов / Проекты развития инфраструктуры города. Перспективные направления развития технологии и проектирования в водохозяйственном комплексе города. Сб. научных трудов. – Вып.8. – М.– 92 – 96.
20. Сабитов А., 1977. Исследование надежности системы подачи и распределения воды в районах с повышенной сейсмичностью: автореф. дис. канд. техн. наук. – М.: МИСИ– 20.
21. Ткачук О., 2008. Удосконалення систем подачі та розподілення води населених пунктів. – Рівне: НУВГП. – 301.
22. Українець Н., 1973. Влияние неравномерности водопотребления на надежность водообеспечения города. – М.: Московский ордена Трудового Красного Знамени инженерно-строительный институт им. В.В. Куйбышева.– 96 – 101.
23. Хоружий П., Хомутецька Т., Хоружий В., 2008. Ресурсозберігаючі технології водопостачання. – К.: Аграрна наука. – 534.
24. Храменков С., 2005. Стратегия модернизации водопроводной сети. – М.: ОАО Изво “Стройиздат”. – 400.
25. Hotłoś H. Analisa strat wody w systemach wodociagowych // Ochrona Srodowiska. – 2003. - №1. – S. 17 – 24
26. Piechurski F. Straty wody i sposoby ich obnizania // Ochrona Srodowiska. – 2/2005, 4/2005, 1/2006, 2/2006.
27. Rak J. Podstawy bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę. – Komitet Inzynierii Srodowiska PAN. – T. 28. – Lublin, 2005. – S. 1 – 215.
28. Rak J., Tchórzewska-Cieślak B. Metody analizy i oceny ryzyka w systemie zaopatrzenia w wodę. - Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2005.

RELIABILITY OF METAL WATER PIPES OF UKRAINE

Oleksandr Matiash

Summary: The water supply network is one of the most important elements in the water supply and distribution system, therefore the reliability aspects of the pipelines should be obligatory taken into consideration during designing of water supply networks. In this article we have ascertained the failure causes, calculated value of the specific parameter of the failure flow and made analytical dependences for four Ukrainian cities.

Key words: metal water pipes, reliability indices, faultlessness, repairability.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД С ПОМОЩЬЮ ПРОБИОТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Надежда Насонкина, Вячеслав Маркин

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры
Адрес: Украина, г. Макеевка, ул. Державина, 2, 86123
E-mail: v.markin1987@gmail.com

Аннотация. Выполнены лабораторные исследования, подтверждающие способность пробиотических средств осуществлять предварительную очистку сточных вод и повышать эффективность традиционной механической и биологической очистки. Достигнут положительный эффект очистки по следующим показателям загрязненности: ХПК, БПК, взвешенным веществам, содержанию азота аммонийных солей.

Ключевые слова: сточные воды, пробиотики, микроорганизмы, очистные сооружения, активный ил, БПК, ХПК, взвешенные вещества, аммонийный азот.

ВВЕДЕНИЕ

Очистка бытовых и производственных сточных вод является важным звеном в созданной человеком техногенной цивилизации, призванным оберегать окружающую природную среду от ее негативного воздействия.

В целом очистка сточных вод достаточно сложный и многостадийный процесс. Тем не менее, основы его были заложены еще в первой половине XX в. и с тех пор принципиально не изменились.

Однако, уровень развития различных отраслей промышленности (например, пищевой, химической, фармацевтической и др.) значительно возрос. В результате на канализационные очистные сооружения (КОС) городов и поселков попадают сточные воды, содержащие ксенобиотики и органические вещества искусственного происхождения, стойкие к биоразложению, большие количества синтетических поверхностно-активных веществ (СПАВ), тяжелые металлы.

В связи с установкой водомеров в квартирах и частных домах уменьшается потребление воды населением [6], что, соответственно, приводит к значительному повышению концентрации загрязнений в сточных водах (ХПК, БПК, взвешенным веществам, аммонийному азоту).

Указанные факторы часто приводят к недостаточной степени очистки сточных вод на КОС, сбоям в работе очистных сооружений.

В то же время, в Украине, например, правилами охраны поверхностных вод [14] и санитарными органами устанавливаются достаточно «высокие» требования к качеству сбрасываемых сточных вод, достичь которые не всегда представляется возможным.

В данной ситуации актуальным является поиск решений, способных без значительных эксплуатационных и капитальных затрат на

строительство новых или реконструкцию имеющихся КОС увеличить эффективность и стабильность очистки сточных вод. Одним из таких решений может быть использование пробиотических средств.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Термин «пробиотик» (пер. с лат. pro bio — «для жизни») предложен Lilly D. M. и Stilwell R. H. в 1965 году в противоположность термину «антибиотик», что означает «против жизни» [33].

По определению ВОЗ пробиотики — это живые микроорганизмы, которые при применении в адекватных количествах вызывают улучшение здоровья организма-хозяина [10;35].

Начало эре пробиотиков положил И. И. Мечников, предложивший в 1907 году употребление молочнокислых продуктов, содержащих лактобациллы, для профилактики и лечения различных заболеваний желудочно-кишечного тракта, а также для предотвращения преждевременного старения и самоотравления организма [12].

В настоящее время пробиотические средства наиболее широко применяются в медицине и ветеринарии, благодаря обширному диапазону лечебно-профилактического действия и экологической безопасности.

Условно влияния пробиотических бактерий можно разделить на три группы: 1) антимикробная активность (бактерицидное воздействие); 2) улучшение барьерной функции слизистой оболочки кишечника; 3) иммуномодуляция [34].

Пробиотики обладают высокой антагонистической активностью против большого спектра патогенных и условно-патогенных бактерий, способностью быстро нормализовать микрофлору кишечника человека и

животного, благоприятно влиять на физиологические, биохимические и иммунные реакции организма [1;23;28;30;32].

Основными пробиотиками являются микроорганизмы, продуцирующие молочную кислоту (наиболее типичные представители нормальной микрофлоры человека) - бактерии родов *Bifidobacterium*, *Lactobacillus*, *Escherichia*, *Enterococcus*, *Aerococcus* или же непатогенные спорообразующие микроорганизмы и сахаромицеты.

Согласно требованиям Продовольственной и сельскохозяйственной организации при ООН (Food and Agriculture organization of the United Nations — FAO) и ВОЗ (2002), микроорганизмы, входящие в состав пробиотика, должны быть непатогенными и нетоксичными; иметь генетический паспорт и доказательство генетической стабильности (быть чувствительными или иметь природную резистентность к антибиотикам), могли бы выживать в кишечнике; сохранять стабильность состава и жизнедеятельность в течение всего срока хранения; должны состоять из клеток, которые обладают высокой адгезивной и антагонистической способностью к патогенным, условно-патогенным микроорганизмам и не ингибируют нормальную микрофлору кишечника [5;7;9;17;20-22].

Высокую эффективность пробиотических препаратов в медицине показывают многочисленные исследования в области гастроэнтерологии, дерматологии, акушерстве, гинекологии, стоматологии, при лечении заболеваний опорно-двигательного аппарата, ревматизма, туберкулеза, сахарного диабета и другой патологии [1-4;29;31;32].

Использование пробиотических средств для очистки сточных вод, наоборот, является сравнительно молодым направлением и не имеет ни широкого применения, ни значительной изученности.

В настоящее время на мировом рынке представлены несколько фирм, выпускающих пробиотические средства для очистки сточных или природных вод от загрязнений, в том числе: *Chrisal* (Бельгия), *Agranco Corp.* (США), *SCD Probiotics* (США).

Препараты указанных фирм-производителей применялись на канализационных очистных сооружениях в Украине, России, Польше, Литве, Индии, США. Описания результатов применения пробиотических средств свидетельствуют о перспективности их использования для интенсификации процессов очистки сточных вод, снижения уровня выделения неприятных запахов и повышения санитарной безопасности объектов канализационного хозяйства [8;13;15;16;27].

Есть свидетельства того, что использование пробиотиков позволяет частично сокращать подачу воздуха на биологическую очистку. При этом показатели очистки сточных вод остаются на прежнем уровне [8;13;26].

Обработка пробиотиками осадка и избыточного активного ила может способствовать сокращению объемов их образования (за счет снижения влажности), стабилизировать и частично обеззараживать осадки, в результате чего они становятся более привлекательными в качестве потенциальных органоминеральных удобрений [24;25].

Механизм действия пробиотических препаратов основан на том, что содержащиеся в них пробиотические бактерии и ферменты, способны быстро разрушать органические вещества в сточных водах и существенно снижать обычные анаэробные процессы, которые сопровождаются выделением неприятных запахов и токсичных газов (аммиака, сероводорода, метана). Кроме того, пробиотические микроорганизмы подавляют деятельность патогенной микрофлоры. При попадании в питательную среду они быстро поглощают субстрат и не оставляют патогенным микроорганизмам возможности для развития.

Представляет интерес проведение дальнейших исследований по определению способности пробиотических средств повышать эффективность очистки сточных вод, снижать интенсивность запаха сточной воды.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной работе исследовалась эффективность предварительной очистки сточных вод с помощью пробиотических средств, а также повышение общей эффективности традиционной механической и биологической очистки сточных вод в результате применения пробиотика.

В качестве пробиотического средства был выбран препарат *PIP WATER PLUS*, производства Бельгийской компании *Chrisal*. Указанный препарат представляет собой жидкость, содержащую большое количество (6,36 млн на 1 мл) бактерий рода *Bacillus*: *Bacillus subtilis*, *Bacillus subtilis* var. *amyloliquefaciens*, *Bacillus licheniformis*, *Bacillus pumilus*, *Bacillus megaterium*, и ферментов.

Бактерии рода *Bacillus* вырабатывают антибактериальные вещества и являются антагонистами в отношении болезнетворных патогенов, способны производить широкий спектр ферментов (трансферазу, гидролазу, липазу), расщепляющих жиры, углеводы и клетчатку, экологически безопасны [11;18;19].

Бациллы являются строго аэробными или факультативно анаэробными грамположитель-

ными хемоорганотрофными микроорганизмами палочковидной формы, способными образовывать термоустойчивые эндоспores.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Исследования проводились на лабораторной установке, состоящей из двух одинаковых емкостей по 6 л и двух компрессоров для подачи воздуха в каждую емкость. Схема одной емкости с компрессором представлена на рисунке 1.

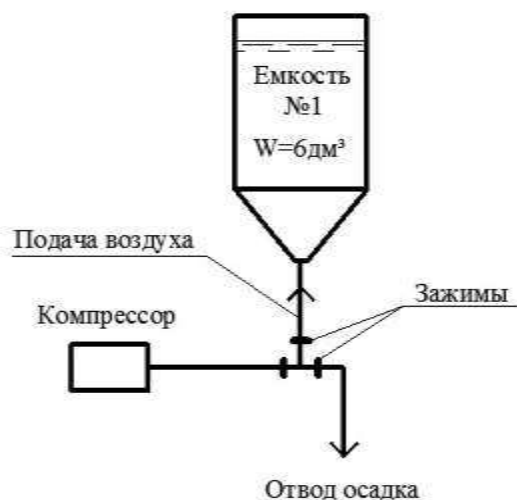


Рис. 1. Емкость №1 с компрессором
Fig. 1. Capacity number 1 with compressor

Емкость №1 – с добавлением пробиотика, №2 – контрольная (без добавления пробиотика).

Предварительную обработку сточной воды пробиотическим средством осуществляли в аэробных условиях.

Эксперимент проходил в три этапа:

- 1) На первом этапе осуществлялась предварительная обработка сточной воды пробиотиком в емкости №1. Для создания аэробных условий и перемешивания в обе емкости периодически подавали воздух. Продолжительность первого этапа – 7 часов.
- 2) Второй этап - отстаивание сточной жидкости. Продолжительность - 1 час.
- 3) Третий этап - биологическая очистка отстаиванной сточной воды активным илом – продолжительность 24 часа.

На втором этапе моделировался процесс первичного отстаивания сточной воды, на третьем этапе – процесс биологической очистки сточной жидкости в аэротенке.

Первый этап - предварительную обработку сточной воды пробиотическим средством в реальных условиях можно осуществлять в емкостных сооружениях, находящихся в

технологической цепочке КОС перед сооружениями биологической очистки – биокоагуляторах, преаэраторах. При этом очевидно, что, чем большее время контакта пробиотического средства со сточной жидкостью удастся обеспечить, тем выше будет эффективность предварительной обработки.

Сточная вода для эксперимента была отобрана на очистных сооружениях г. Димитров на входе, активный ил – из иловой камеры вторичного отстойника.

Доза исходного пробиотического препарата PIP WATER PLUS составляла 0,01 мл на 1дм^3 сточной воды.

Схема эксперимента следующая.

Емкости наполняли сточными водами (по 6 л в каждую). После чего в емкость №1 добавляли приготовленный раствор пробиотического средства. Далее сточную воду в обеих емкостях перемешивали в аэробных условиях. Перемешивание осуществляли периодической подачей воздуха в емкости.

Через 7 часов перемешивание останавливали и отстаивали сточную жидкость в течение часа. После отстаивания спускали осадок, осевший в конусной части емкостей (моделирование первичного отстаивания). Далее из каждой емкости отбирали пробы воды и добавляли в них активный ил в одинаковых количествах. После чего возобновляли подачу воздуха в емкости для перемешивания иловой смеси и насыщения ее кислородом (моделирование биологической очистки в аэротенках). Пробы воды отбирали через 7 и 24 часа после начала биологической очистки.

Отобранные пробы анализировались на следующие показатели: ХПК, БПК₅, взвешенные вещества, содержание аммонийного азота, нитритов и нитратов (в завершении биологической очистки), интенсивность запаха. Кроме того, контролировалась доза ила в иловой смеси, pH и температура сточной жидкости. Осуществлялся гидробиологический контроль активного ила.

Для приготовления рабочего раствора пробиотика использовали водопроводную отстоянную воду в соотношении 100:3, которую перед добавлением пробиотического средства подогревали до температуры 37 °С. После добавления пробиотика необходимо около 2 часов для активизации пробиотических микроорганизмов (выхода бактерий из спорового состояния).

Всего было проведено три серии опытов, усредненные результаты которых приведены в таблице 1.

Графики снижения ХПК, БПК₅, взвешенных веществ и аммонийного азота в сточных водах в емкостях №1 и №2 приведены на рисунках 2-5.

Таблица 1. Результаты исследования предварительной очистки сточных вод пробиотиком PIP WATER PLUS
 Table 1. Results of a study of preliminary treatment of wastewater by probiotic PIP WATER PLUS

Длительность очистки, ч	T, °C	pH	БПК ₅ , мг/дм ³		ХПК, мг/дм ³		Взвешенные вещ-ва, мг/дм ³		Аммонийный азот, мг/дм ³		Нитриты, мг/дм ³		Нитраты, мг/дм ³		Доза ила, г/дм ³		Запах, балл	
			№1	№2	№1	№2	№1	№2	№1	№2	№1	№2	№1	№2	№1	№2	№1	№2
0	18-19	8,2-8,3	184,3	184,3	461	461	503	503	68,0	68,0	-	-	-	-	-	-	5	5
8	18-19	8,2-8,3	86,4	173	298	450	297	374	52,7	63,0	-	-	-	-	-	-	2	5
15	18-19	8,1-8,2	24,4	34,9	69	91	98	152	32,8	38,2	-	-	-	-	2,1-2,3	2,1-2,2	1	3
32	18-19	8,0-8,1	13,2	16,6	57	78	88	115	3,1	3,9	35	34	132	126	2,0-2,2	2,0-2,2	0	0

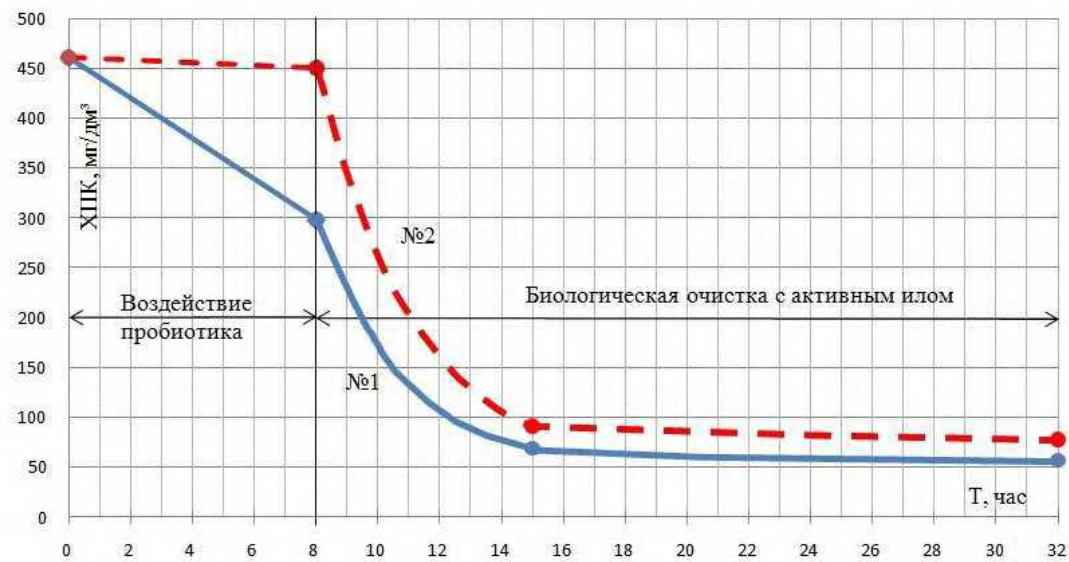


Рис. 2. График снижения ХПК
 Fig. 2. Graph of reduction of COD

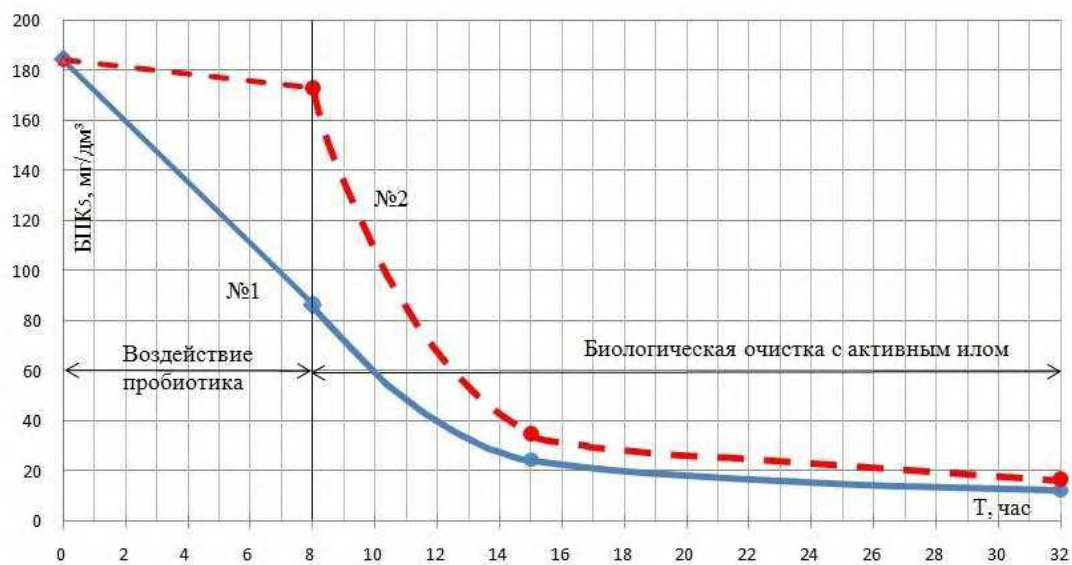


Рис. 3. График снижения БПК₅
 Fig. 3. Graph of reduction of BOD₅

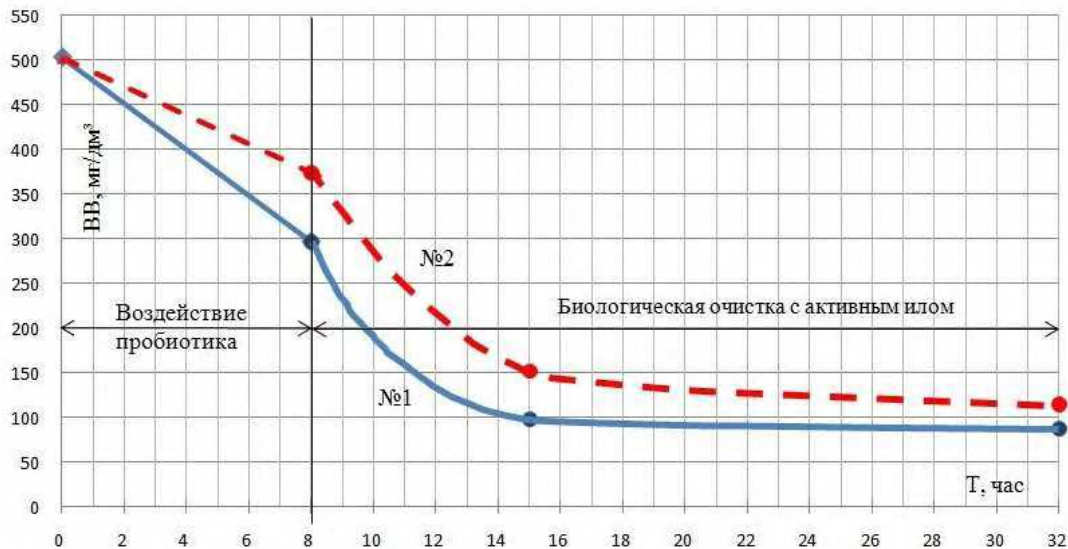


Рис 4. График снижения взвешенных веществ
Fig. 4. Graph of reduction of suspended solids

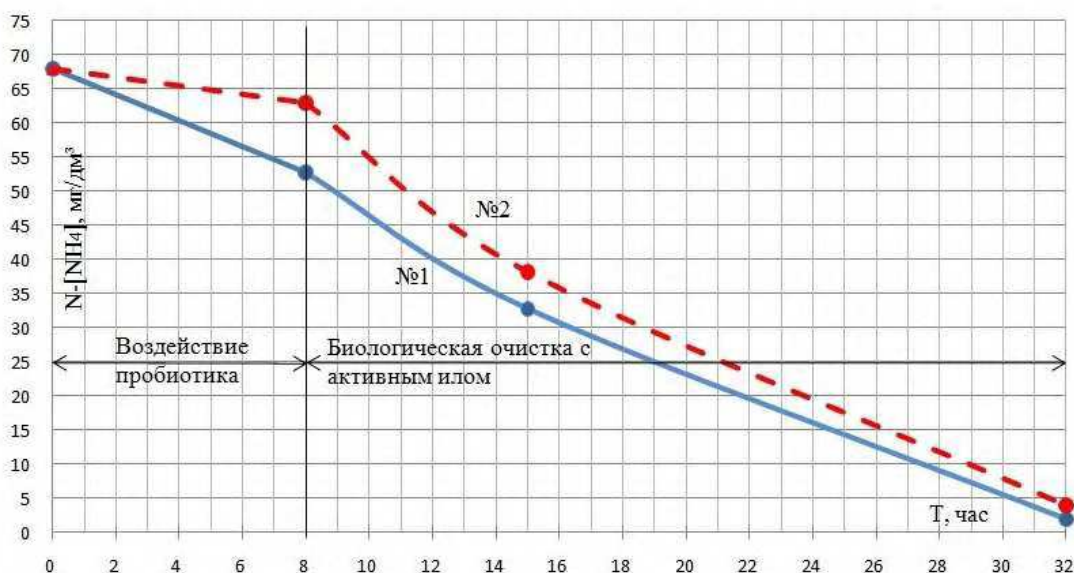


Рис 5. График снижения азота аммонийного
Fig. 5. Graph of reduction of ammonia nitrogen

В емкости №1 после 7 часов обработки пробиотическим средством и отстаивания характеристики загрязненности сточной жидкости снижались более интенсивно по сравнению с контрольной емкостью (без пробиотика):

- ХПК в емкости №1 снижалось в среднем на 35,4%, в контрольной емкости - на 2,4%;
- БПК₅ в емкости №1 уменьшалось в среднем на 53,1%, в емкости №2 - на 6,1%;
- взвешенные вещества после отстаивания в емкости №1 снижались в среднем на 40,9%, в то время как в емкости №2 - на 25,6%;
- содержание азота аммонийного в первой емкости уменьшалось в среднем на 22,5%, во второй емкости - на 7,4%.

Таким образом, добавление пробиотика значительно снижало показатели загрязненности в сточной воде в емкости №1.

Кроме того, после 8 часов контакта сточных вод с пробиотическим средством интенсивность запаха уменьшалась на 3 балла. В контрольной емкости интенсивность запаха оставалась на прежнем уровне.

Следует отметить, что в пробиотическом средстве отсутствуют нитрифицирующие бактерии. Содержание нитрификаторов в исходной сточной воде очень незначительно для протекания процесса нитрификации. Поэтому частичное снижение аммонийного азота в обеих емкостях за период перемешивания, вероятно, связано с отдувкой аммиачного газа воздухом, подаваемым в емкости.

После биологической очистки с активным илом в течение 7 часов разница между эффективностью очистки в емкостях №1 и №2 сокращается (значения приведены в процентах от первоначальной концентрации загрязнений):

- эффективность очистки по ХПК составляла в среднем 85% в первой емкости и 80% во второй емкости;
- снижение БПК₅ составляло в среднем 93,4% в емкости №1 и 90% в емкости №2;
- взвешенные вещества уменьшались в среднем на 80,5% и на 69,8% соответственно;
- содержание аммонийного азота снижалось на 51,8% и на 43,8% соответственно.

Сокращение разницы между указанными показателями сточной воды в емкостях №1 и №2 в процессе биологической очистки связано, по-видимому, с большой окислительной способностью активного ила.

После биологической очистки предварительно обработанной пробиотиком сточной жидкости в течение 7 часов значения контролируемых загрязнений в емкости №1 были ниже, чем в контрольной емкости №2:

- ХПК в среднем на 24,2%,
- БПК₅ - на 30,1%,
- взвешенные вещества - на 35,5%,
- аммонийный азот - на 14,1%.

Через 24 часа биологической очистки разница между концентрациями загрязнений в емкостях №1 и №2 составляла:

- ХПК в первой емкости меньше, чем во второй в среднем на 26,9%,
- БПК₅ - на 20,5%,
- взвешенные вещества - на 23,5%,
- аммонийный азот - на 20,5%.

По основным показателям сточная вода через 24 часа биологической очистки соответствовала уровню биологически полностью очищенной воды. Исключение составляли лишь взвешенные вещества.

Столь длительное время, необходимое для полной очистки, связано с повышенными концентрациями загрязнений в сточной воде, поступающей на КОС г. Димитров.

Высокое содержание нитритов в конечных стадиях опытов свидетельствует о затянувшемся процессе нитрификации, а точнее второй его стадии – окислении нитритов в нитраты. Длительный процесс нитрификации в данном случае связан с высоким значением аммонийного азота в исходной воде – 68 мг/дм³.

Температура в обеих емкостях была одинаковой и составляла 18 - 19 °С на протяжении всего процесса. Интенсивность аэрации в емкостях также была одинакова. Доза ила находилась на уровне 2,0-2,3 г/дм³. Водородный показатель в обеих емкостях составлял 8,2-8,3 на начальном этапе и далее снижался до 8,0-8,1 на конечной стадии опытов.

Таким образом, обе емкости находились в равных условиях, за исключением добавления пробиотического средства в емкость №1 в начале эксперимента.

Гидробиологические анализы активных илов емкостей №1 и №2 на протяжении опытов не выявили значительных различий между составами, численностью и подвижностью микробиоценозов.

Видовой состав активных илов насчитывал всего около 12-14 видов микроорганизмов, в том числе: прикрепленные и свободноплавающие инфузории (*Vorticella*, *Opercularia*, *Epistulis*, *Paramecium*, *Euplotes*, *Aspidisca*), раковинные амебы (*Arcella*, *Euqlypha*), круглые и щетинистые черви, несколько видов коловраток.

В целом видовой состав микробиоценозов илов обеих емкостей соответствовал хорошо работающему активному илу.

Таким образом, можно утверждать, что пробиотические микроорганизмы не оказывают угнетающего воздействия на микробиоценоз активного ила.

ВЫВОДЫ

Использование средств, содержащих пробиотическую микрофлору, для предварительной очистки сточных вод позволяет снижать основные показатели загрязненности воды, поступающей на биологическую очистку и повышать общую эффективность механической и биологической очистки.

Установлено, что после 7 часов обработки сточной воды пробиотиком PIP WATER PLUS дозой 0,1 мл/дм³ и часового отстаивания ХПК сточной воды снижается на 35,4%, БПК₅ - на 53,1%, содержание аммонийного азота на 22,5%, увеличивается эффективность первичного отстаивания на 15,3% (по сравнению с контролем).

Таким образом, применение пробиотических средств для предварительной очистки сточных вод целесообразно в том случае, если на очистные сооружения поступают сточные воды повышенной загрязненности либо по иным причинам окислительной способности сооружений биологической очистки недостаточно для очистки сточных вод до установленных показателей.

Кроме того, добавление пробиотика позволяет значительно снизить интенсивность запаха, что косвенно говорит о снижении выделений токсичных газов (аммиака, сероводорода) из сточной жидкости. Поэтому использование пробиотического средства будет способствовать повышению санитарной безопасности объектов транспортировки и очистки сточных вод.

Преимуществом пробиотических средств перед химическими реагентами является отсутствие опасности негативного воздействия на микробиоценоз активного ила и образования осадков, содержащих в своем составе химические вещества, значительно затрудняющие их утилизацию.

Предварительная очистка сточных вод пробиотиками возможна путем введения их непосредственно на КОС, используя емкостные сооружения, находящиеся в технологической цепочке перед сооружениями биологической очистки (песколовки, биокоагуляторы, преаэраторы или первичные отстойники), либо на канализационных насосных станциях, подающих сточные воды на очистные сооружения.

Перспективными являются дальнейшие исследования по определению зависимостей скорости снижения основных загрязнений в сточной воде от температуры жидкости, дозы пробиотического средства и кислородных условий (анаэробии и аэробии), а также лабораторные исследования пробиотиков на динамической модели очистной станции в проточном режиме, т. к. накопительное воздействие пробиотического средства (постоянный ввод раствора пробиотика) может оказать более весомое влияние на эффективность очистки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешкин В. А. Становление пробиотикотерапии в России [Текст] / Алешкин В. А., Афанасьев С. С., Поспелова В. В. и др. // Вестник РАМН. – 2005. – № 12. – С. 3 – 13.
2. Бондаренко В. М. Дисбиотические состояния и лечебные мероприятия при них [Текст] / Бондаренко В.М., Грачева Н.М. // Вестник РАМН. - 2005. - № 12. - С. 24-29.
3. Воробьев А. А. Микроэкологические нарушения при клинической патологии и их коррекция бифидосодержащими пробиотиками [Текст] / Воробьев А. А, Бондаренко В. М, Лыкова Е. А. и др // Вестник РАМН. - 2004 а. - №2. - С.13 - 17.
4. Григорьев П. Я. Диагностика и лечение органов пищеварения [Текст] / Григорьев П. Я., Яковенко Э. П. // СПб: Сотис, 1997. - 180 с.
5. Гришель А. И. Пробиотики и их роль в современной медицине [Текст] / Гришель А. И., Кишкурно Е. П. // Вестник фармации. — 2009. — № 1 (43). — С. 90 - 93.
6. Зайченко Л. Анализ реального водопотребления в жилищном фонде [Текст] / И. Зайченко Л., Синежук И. // MOTROL. — Commission of motorization and energetics in agriculture : Polish Academy of sciences. — Lublin, 2012. — Vol. 14 — №1. — P. 54—57.
7. Захарова И. Н. Современные пробиотики для коррекции микробиоценоза кишечника у детей [Текст] / Захарова И. Н., Мазанкова Л. Н., Дмитриева Ю. А. // Вопросы современной педиатрии. — 2009. — Т. 8, № 2. — С. 109 - 113.
8. Ильин С. Н. Наша миссия - сделать жизнь горожан качественной, а услуги доступными [Электронный ресурс] / Ильин С. Н. // Вода Magazine. – 2011. №2 (54). – Режим доступа: http://www.watermagazine.ru/journal/izdanie/4247-2011-11-30-13-33-17?Itemid=54&option=com_content&id=4247:2011-11-30-13-33-17&view=article&layout=default&month=10&year=2011
9. Кривушев Б. И. Дисбактериоз и пробиотики [Текст] / Кривушев Б. И. // Здоровье ребенка. — 2010. — № 3 (24).
10. Ладодо К. С. Использование продуктов про- и пребиотического действия в детском питании [Текст] / Ладодо К. С, Боровик Т. Э, Скворцова В. А. // Вопросы современной педиатрии. - 2006. - № 6. - том 5. – С. 64 - 69.
11. Мелентьев А. И. Аэробные спорообразующие бактерии *Bacillus Cohn* в агроэкосистемах [Текст] / Мелентьев А. И. // М.: Наука. - 2007. – 149с.
12. Мечников И. И. Этюды оптимизма [Текст] / Мечников И. И. // М: Наука, 1988. — 328 с.
13. Отчет о применении биорегенератора «Оксидол» на очистных сооружениях канализации МУП «Водоканал» (г. Череповец) [Электронный ресурс] / МУП «Водоканал»; рук. Прошин Э. А. – Череповец, 2011. – Режим доступа: http://wodoswet.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=37:per&catid=19:per&Itemid=43
14. Правила охорони поверхневих вод від забруднення зворотними водами [Текст] / Кабінет міністрів України. – Київ, 1999. - 5 с.
15. Протокол проведения научно-практических исследований «Изучение влияния пробиотических микроорганизмов на процессы биологической очистки сточных вод г. Киева и прилегающих городов и поселков Киевской области на сооружениях ПАО «АК «Киевводоканал» [Электронный ресурс] / ПАО «АК «Киевводоканал»; рук. Кислый Н. И. ; исполн.: Гегнер Б. М. [и др.]. – Киев, 2011. - 6 с. – Режим доступа: <http://www.altehcom.com/upload/files/Otcet%20ocistki%20stocnih%20vod%20Kievvodocanal.pdf>
16. Применение пробиотиков для очистки сточных вод [Электронный ресурс] : сайт компании «АВАІ». - Режим доступа: <http://www.avai.lt/index.php/ru/---/nuotek-valymas.html>
17. Роль пробиотиков в питании детей грудного возраста. Заключение экспертов по итогам круглого стола (9 декабря 2008 г., Киев) [Текст] // Здоровье ребенка. — 2009. — № 3 (18).

18. Смирнов В. В. Спорообразующие аэробные бактерии — продуценты биологически активных веществ [Текст] / Смирнов В. В., Резник С. Р., Василевская И. А. // К.: Наук. Думка. - 1982. - 279 с.
19. Сорокулова И. Б. Перспективы применения бактерий рода *Vacillus* для конструирования новых биопрепаратов [Текст] / Сорокулова И. Б. // Антибиотики и химиотерапия. - 1996. - Т.41, № 10. - С. 13-15.
20. Урсова Н. И. Пробиотики в комплексной коррекции дисбактериоза кишечника у детей [Текст] / Урсова Н. И. // Лечащий врач: Журнал для профессионалов в медицине. — 2008. — № 1. — С. 12 - 14.
21. Учайкин В. Ф. Пробиотики в педиатрии [Текст] / Учайкин В. Ф. // Детские инфекции. — 2008. — Т. 7, № 3. — С. 55 - 56.
22. Хавкин А. И. Пробиотические продукты питания и естественная защитная система организма [Текст] / Хавкин А. И. // Русский медицинский журнал: Независимое издание для практикующих врачей. — 2009. — Т. 17, № 4. — С. 241 - 245.
23. Bermudez-Brito M. Probiotic mechanisms of action [Text] / M. Bermudez-Brito, J. Plaza-Diaz, S. Munoz-Quezada et. al. // *Ann. Nutr. Metab.* — 2012. — 61(2). — 160-74; doi: 10.1159/000342079.
24. Case Study Summary – Lowicz, Poland 2006 [Electronic resource] / Site company SCDprobiotics. – Режим доступа: <http://www.scdprobioticstech.com/environmental/case-studies/2006-case-study-summary-lowicz-poland-52>
25. Case Study Summary – Rocky Branch – Kansas City, MO, USA 2011 [Electronic resource] / Site company SCD probiotics. – Режим доступа: <http://www.scdprobioticstech.com/environmental/case-studies/2011-rocky-branch-case-study-summary-55/>
26. Case Study Summary – Saving Energy in WWTP, India ECOSYSTEM TECHNOLOGY 2007 [Electronic resource] / Site company SCD probiotics. – Режим доступа: <http://www.scdprobioticstech.com/environmental/case-studies/2007-case-study-summary-saving-energy-in-wwtp-india-ecosystem-technology-250>
27. Case Study Summary – Turek, Poland 2005 [Electronic resource] / Site company SCDprobiotics. – Режим доступа: <http://www.scdprobioticstech.com/environmental/case-studies/2005-case-study-summary-turek-poland-51>
28. Dongarra M. L. Mucosal immunology and probiotics [Text] / Dongarra M. L., Rizzello V., Muccio L. et. al. // *Curr. Allergy Asthma Rep.* — 2013 Feb. — 13(1). — 19-26; doi: 10.1007/s11882-012-0313-0.
29. Drisko J. A. Probiotics in health maintenance and disease prevention [Text] / Drisko J. A., Giles Ch. K., Bischoff B. J. // *Alternative Medicine Review.* - 2003. - Vol. 8, No. 2. - P. 143 - 155.
30. Hoffmann D. E. Science and regulation. Probiotics: finding the right regulatory balance [Text] / Hoffmann D. E., Fraser C. M., Palumbo F. B. et. al. // *Science.* — 2013, Oct 18. — 342(6156). — 314-5; doi: 10.1126/science.1244656.
31. Klaenhammer T. R. Probiotic bacteria: today and tomorrow [Text] / Klaenhammer T. R. // *J. Nutr.* 2000. - No 130. - P. 415 - 416.
32. Landy J. Commentary: the effects of probiotics on barrier function and mucosal pouch microbiota during maintenance treatment for severe pouchitis in patients with ulcerative colitis [Text] / Landy J., Hart A. // *Aliment. Pharmacol. Ther.* — 2013 Dec. — 38(11–12). — 1405-6; doi: 10.1111/apt.12517.
33. Lilly D. M. Probiotics: growth-promoting factors produced by microorganisms [Text] / Lilly D. M., Stillwell R. H. // *Science.* — 1965, Feb 12. — 147(3659). — 747-8; doi:10.1126/science.147.3659.747
34. Ng S. C. Mechanisms of action of probiotics: recent advances [Text] / Ng S. C., Hart A. L., Kamm M. A., Stagg A. J., Knight S. C. // *Inflamm. Bowel Dis.* — 2009. — Vol. 15, № 2. — P. 300-310; doi: 10.1002/ibd.20602.
35. Report of a Joint FAO/WHO Expert Consultation on Evaluation of Health and Nutritional Properties of Probiotics in Food Including Powder Milk with Live Lactic Acid Bacteria (October 2001).

PROVISIONAL WASTEWATER TREATMENT BY PROBIOTIC AGENTS

Abstract. Performed laboratory studies confirming the ability of probiotic agents to implement preliminary treatment of wastewater and improve the effectiveness of traditional mechanical and biological treatment. Achieved a positive treatment effect on the following indicators of pollution: COD, BOD, suspended solids, content of nitrogen of ammonium salts.

Key words: wastewater, probiotics, microorganisms, sewage treatment plants, activated sludge, BOD, COD, suspended solids, ammonia nitrogen.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ОТСТОЙНИКА С ПОРИСТОЙ ПЕРЕГОРОДКОЙ

Степан Эпоян, Дмитрий Сухоруков, Тамара Айрапетян¹

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

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

E-mail: sukhorukov.dmitr@gmail.com

1. Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова

Адрес: Украина, г. Харьков, ул. Революции, 12

E-mail: tamara78kh2008@rambler.ru

Аннотация. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, показывающие эффективность работы горизонтальных отстойников с пористой полимербетонной перегородкой.

Ключевые слова: горизонтальный отстойник, пористая полимербетонная перегородка, коэффициент эффективности

ВВЕДЕНИЕ

Горизонтальные отстойники эксплуатируются на многих станциях очистки природных вод и являются наиболее распространенными сооружениями первой ступени очистки природных вод для хозяйственно-питьевых целей [9, 20, 22, 23]. К достоинствам этих сооружений можно отнести: простоту эксплуатации и надёжность в работе в различные периоды года, практическое не влияние на работу этих сооружений концентрации взвешенных веществ в воде, поступающей на очистку и колебание расходов воды, работу данных сооружений в экстремальных условиях (радиоактивное заражение воды и т.д.) [10, 13]

К основным недостаткам горизонтальных отстойников относится их неудовлетворительная работа при осветлении маломутных вод, и тем более при низких температурах [8, 22 – 24].

Повышение эффективности работы горизонтальных отстойников при осветлении маломутных вод, поступающих на очистные сооружения, является актуальной задачей, т.к в основном реки зарегулированы и мутность воды в них редко превышает более 80 мг/л [20, 22, 23].

Понятие маломутной воды – относительное. Поэтому принимаем такие воды, которые находятся в пределах до 70÷80 мг/л.

С другой стороны известно, что горизонтальные отстойники работают лучше, чем больше концентрация взвешенных веществ, поступающих на них [8, 10].

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Горизонтальные отстойники являются важным элементом очистных сооружений для подготовки питьевой воды. От эффективности их работы зависит продолжительность фильтроцикла

скорых фильтров и, следовательно, затраты связанные с промывкой

Повышение эффективности работы горизонтального отстойника может идти разными путями: изменением типа реагента применяемого по сезонам года, изменением его дозирования, изменением устройств распределения исходной и сбора осветленной воды и другими путями [3, 4, 8-10].

В настоящее время существуют рассредоточенные и сосредоточенные конструкции сбора осветленной воды. Рассредоточенные конструкции сбора воды представляют собой систему труб или лотков, которая располагается на определенной длине площади отстойника, считая от места выхода осветленной воды из отстойника [4, 8, 17], а сосредоточенные – торцевой сборный лоток осветленной воды, перед которым может располагаться дырчатая перегородка, с целью недопущения увеличения скорости подхода воды к переливной кромки лотка более скорости подсасывания осадка [10, 22, 23].

Недостатком данных устройств является то, что в районе их расположения за счет перераспределения скорости появляются значительные вертикальные составляющие потока, направленные вверх, что значительно ухудшает процесс осветления воды в горизонтальном отстойнике. Поэтому было предложено установить пористую полимербетонную перегородку перед торцевым сборным лотком осветленной воды [14, 15]. Пористый полимербетон не подвергается биообрастанию, коррозии, долговечен и уже долгое время эксплуатируется в системах водоочистки [5-7].

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью исследований являлась разработка математической модели, описывающей осаждения

взвеси в горизонтальном отстойнике, учитывающей режим движения и влияние различных конструкций сбора осветленной воды и проверка ее экспериментальным путем.

Теоретические исследования базировались на разработке математической модели, позволяющей выбрать такие конструкции сбора осветленной воды отстойника, при которой эффективность очистки будет максимальной, а также на экспериментальных данных подтверждающие теоретические исследования.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Основу математической модели составляли следующие уравнения:

– уравнения переноса количества движения:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial z} = X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma \frac{\partial u}{\partial z} - \overline{u'v'} \right) + \gamma \frac{\partial^2 u}{\partial x^2};$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial z} = Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \gamma \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right);$$

– уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0;$$

– уравнение, описывающее траекторию частицы взвеси:

$$\frac{\partial x}{u} = \frac{\partial z}{v - v_w},$$

где: x, z – координаты ($z = 0$ соответствует расположению дна отстойника), t – фиктивное время, u, v – соответственно продольная (горизонтальная) и поперечная (вертикальная) составляющие скорости, X, Z – соответственно продольная (горизонтальная) и поперечная (вертикальная) составляющие массовых сил, p – давление, γ – коэффициент кинематической вязкости, v_w – гидравлическая крупность частицы взвеси, $\overline{u'v'}$ – турбулентный поток количества движения.

Параметр $\overline{u'v'}$ является неизвестной величиной. Для его определения использовали зависимости градиентной модели замыкания Прандтля [10]:

$$-\overline{u'v'} = K \cdot \frac{\partial u}{\partial z} = l^2 \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \cdot \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| = (\chi \cdot z)^2 \frac{\partial u}{\partial z} \cdot \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right|, \quad (5)$$

где: K – коэффициент турбулентной вязкости, l – «длина смешения» Прандтля.

Для решения системы уравнений (1) – (5) задавали следующие граничные условия:

– осветляемая вода подводится через дырчатую перегородку, расположенную по всей высоте отстойника. Таким образом, на *левой границе* граничное условие будет:

$$x = 0, u = U_{cp}, v = 0,$$

– на *верхней границе* для отстойника с пористой перегородкой или лотком в торце:

$$z = H; \frac{\partial u}{\partial z} = 0; v = 0;$$

– на *верхней границе* для отстойника с рассредоточенной системой отбора воды:

$$z = H, u = 0, \text{ если } 0 < x < L - L_1, \text{ то } v = 0,$$

$$z = H, u = 0, \text{ если } 0 < x < L - L_1, \text{ то } v = V_{cp},$$

– на *нижней границе* для всех трех конструкций:

$$z = 0, u = 0, v = 0,$$

– на *правой границе* для отстойника с лотком:

$$x = L, v = 0, \text{ если } 0 < z < H_1, \text{ то } u = 0,$$

$$x = L, v = 0, \text{ если } 0 < z < H - H_1,$$

$$\text{то } u = U_{cp} \frac{H}{H - H_1};$$

– на *правой границе* для отстойника с рассредоточенной системой отбора воды:

$$x = L, v = 0, u = 0,$$

где: L – длина рабочей части отстойника, H – высота отстойника, L_1 – длина системы рассредоточенного отбора воды, H_1 – высота расположения лотка для сбора осветленной воды, U_{cp} – средняя скорость потока.

Для описания граничных условий на правой границе для отстойника с пористой перегородкой необходимо решить сопряженную задачу гидродинамики потоков в отстойнике и пористой перегородке. Для этого необходимо дополнительно использовать уравнение Лапласа (6) для расчета распределения напора h внутри перегородки и формулу Дарси (7) для определения поля скорости [19]:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0; \quad (6)$$

$$u = -k \frac{\partial h}{\partial x} \quad (7)$$

где: k – коэффициент фильтрации пористой перегородки.

Граничные условия для уравнения (6) имеют вид:

– верхняя граница:

$$z = H, h = 0,$$

– нижняя граница:

$$z = 0; h = H - \frac{\Delta H x}{\Delta L};$$

– левая граница:

$$x = 0; h = H \left(1 - \frac{z}{H} \right);$$

– правая граница:

$$x = \Delta L; h = (H - \Delta H) \left(1 - \frac{z}{H} \right).$$

Численное решение уравнений (1) – (7) происходит следующим образом. На каждом шаге по времени выполняется решение уравнения (6), далее из выражения (7) определяется значения продольной скорости на правой границе отстойника ($x = L$). После этого из уравнения (1) рассчитывается распределение продольной скорости u и распределение поперечной скорости v из уравнения (2) или уравнения (3).

При расчете поля скорости в отстойнике с пористой перегородкой или с лотком для отбора

воды, расположенном в торце необходимо использовать уравнения (1) и (3), а при расчете отстойника с рассредоточенной системой отбора воды уравнения (1) и (2).

Численное решение уравнений (1), (2) и (6) осуществляется методом продольно-поперечной прогонки. Для этого эти уравнения при продольной прогонке представляются в виде конечно-разностного аналога [16]:

$$-A_i \cdot f_{i+1,j,k} + B_i \cdot f_{i,j,k} - C_i \cdot f_{i-1,j,k} = D_i, \quad (9)$$

где: для уравнения (6):

$$A_i = \frac{1}{\Delta x_1^2}; B_i = \frac{2}{\Delta x_1^2} + \frac{2}{\Delta z^2}; C_i = \frac{1}{\Delta x_1^2}; D_i = \frac{h_{i+1,j,k-1} + h_{i,j,k-1}}{\Delta z^2};$$

для уравнения (1):

$$A_i = \frac{\gamma}{\Delta x^2} - \frac{u_{i,j,k-1}}{2\Delta x}; B_i = \frac{1}{\Delta t} - \frac{2\gamma}{\Delta x^2}; C_i = \frac{\gamma}{\Delta x^2} + \frac{u_{i,j,k-1}}{2\Delta x};$$

$$D_i = X + \frac{u_{i,j,k-1}}{\Delta t} + \gamma \frac{u_{i+1,j,k-1} - 2u_{i,j,k-1} + u_{i-1,j,k-1}}{\Delta z^2} - v_{i,j,k-1} \frac{u_{i+1,j,k-1} - u_{i-1,j,k-1}}{2\Delta x};$$

для уравнения (2):

$$A_i = \frac{\gamma}{\Delta x^2} - \frac{u_{i,j,k-1}}{2\Delta x}; B_i = \frac{1}{\Delta t} - \frac{2\gamma}{\Delta x^2}; C_i = \frac{\gamma}{\Delta x^2} + \frac{u_{i,j,k-1}}{2\Delta x};$$

$$D_i = Z + \frac{v_{i,j,k-1}}{\Delta t} + \gamma \frac{v_{i+1,j,k-1} - 2v_{i,j,k-1} + v_{i-1,j,k-1}}{\Delta z^2} - v_{i,j,k-1} \frac{v_{i+1,j,k-1} - v_{i-1,j,k-1}}{2\Delta z};$$

где: f – рассчитываемая функция: u, v или h ,
 $\Delta x, \Delta z, \Delta t$ – шаг по x, z и $t, \Delta x_1$ – шаг по x для пористой перегородки,
 i, j, k – номера узлов по x, z и t ,
 τ – турбулентный поток количества движения, рассчитываемый согласно зависимости (5).

При поперечной прогонке уравнения (1), (2) и (6) представляются в виде, следующего конечно-разностного аналога:

$$-A_j \cdot f_{i,j+1,k} + B_j \cdot f_{i,j,k} - C_j \cdot f_{i,j-1,k} = D_j, \quad (9)$$

где: для уравнения (6):

$$A_j = \frac{1}{\Delta z^2}; B_j = \frac{2}{\Delta x_1^2} + \frac{2}{\Delta z^2}; C_j = \frac{1}{\Delta z^2}; D_j = \frac{h_{i+1,j,k-1} + h_{i-1,j,k-1}}{\Delta x_1^2};$$

для уравнения (1):

$$A_j = \frac{\gamma}{\Delta z^2} - \frac{v_{i,j,k-1}}{2\Delta z}; B_j = \frac{1}{\Delta t} - \frac{2\gamma}{\Delta z^2}; C_j = \frac{\gamma}{\Delta z^2} + \frac{v_{i,j,k-1}}{2\Delta z};$$

$$D_j = X + \frac{u_{i,j,k-1}}{\Delta t} + \gamma \frac{u_{i+1,j,k-1} - 2u_{i,j,k-1} + u_{i-1,j,k-1}}{\Delta x^2} - u_{i,j,k-1} \frac{u_{i+1,j,k-1} - u_{i-1,j,k-1}}{2\Delta x} + \frac{\tau_{ij} - \tau_{i,j-1}}{\Delta z};$$

для уравнения (2):

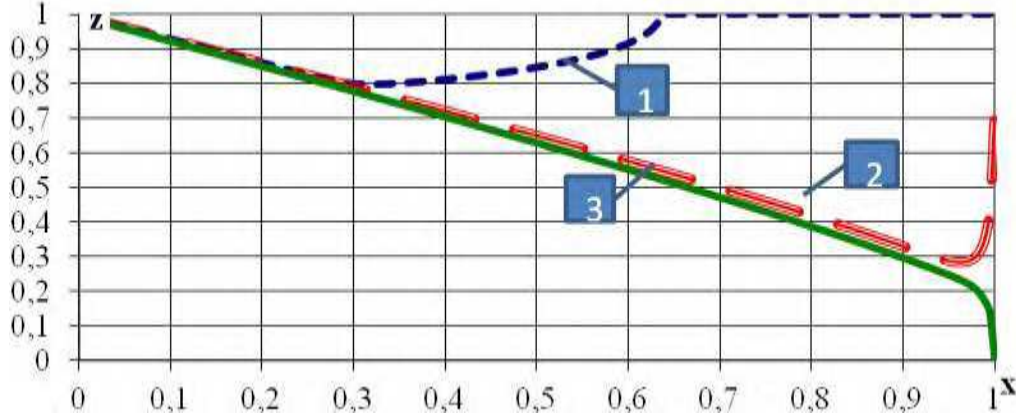


Рис. 1. График траектории частиц взвеси в зависимости от конструкции отвода осветляемой воды
 Fig. 1. The Schedule trajectories of suspended particles depending on the design of the clarified water discharge

$$A_i = \frac{\gamma}{\Delta z^2} - \frac{v_{i,j,k-1}}{2\Delta z}; B_i = \frac{1}{\Delta t} - \frac{2\gamma}{\Delta z^2}; C_i = \frac{\gamma}{\Delta z^2} + \frac{v_{i,j,k-1}}{2\Delta z};$$

$$D_i = Z + \frac{v_{i,j,k-1}}{\Delta t} + \gamma \frac{v_{i+1,j,k-1} - 2v_{i,j,k-1} + v_{i-1,j,k-1}}{\Delta x^2} - u_{i,j,k-1} \frac{v_{i+1,j,k-1} - v_{i-1,j,k-1}}{2\Delta x};$$

Уравнения (8) и (9) заменяются рекуррентным соотношением и решаются с помощью прямой и обратной прогонки [21].

Конечно-разностный аналог уравнения неразрывности (3) имеет вид:

$$v_{i,j,k} = v_{i,j-1,k} - (u_{i,j,k} - u_{i-1,j,k}) \frac{\Delta z}{\Delta x}. \quad (10)$$

Если на текущем шаге по времени какая-либо величина неизвестна, то подставляется ее значение на предыдущем шаге и проводятся итерации.

После вычисления распределения составляющих скорости по пространству отстойника рассчитывается траектория частицы с гидравлической крупностью v_w . Для этого в уравнении (4) дифференциалы dx и dz заменяются конечными разностями Δx и Δz . Для каждого x_i рассчитывается Δz_i , а координата z определяется как $z_i = z_{i-1} - \Delta z_i$. Значения составляющих скорости u и v для данных значений x_i и z_i находятся с помощью линейной интерполяции. Расчетная гидравлическая крупность определяется, исходя из условия $z_n \approx 0$.

С помощью данной математической модели были рассчитаны траектории частиц взвеси с одинаковой гидравлической крупностью для следующих конструкций отвода осветляемой воды:

- 1 - системы рассредоточенного отбора воды,
- 2 - лотка, расположенного в торце отстойника,
- 3 - пористой перегородки из полимербетона.

На рис. 1 приведен график траектории частиц взвеси в зависимости от конструкции отвода осветляемой воды.

Из рис. 1 видно, что осаждение частиц взвеси происходит более интенсивно при установке пористой полимербетонной перегородки на выходе потока воды из горизонтального отстойника.

Для проверки математической модели, описывающей осаждение взвеси в горизонтальном отстойнике, были проведены экспериментальные исследования на модели горизонтального отстойника. Моделирование горизонтального отстойника проводили по критерию Фруда [11, 12, 18]. Экспериментальная модель представляет собой лоток длиной в 6,35м, в начале которого находится вихревая камера хлопьеобразования с вертикальными стенками длиной 1,05м. За камерой хлопьеобразования начинается отстойник в начале которого установлена дырчатая перегородка, которая наиболее эффективно распределяет воду по сечению отстойника [1, 20]. В конце отстойника перед водосливом устанавливали дырчатую или пористую полимербетонную перегородку. На рис.2 представлен общий вид экспериментальной установки горизонтального отстойника.

Экспериментальная установка состоит из узла приготовления исходной воды (1), дозирования коагулянта (2), бака исходной воды (3), бака

постоянного уровня воды (4) из которого исходная вода поступает в камеру хлопьеобразования (5) и далее через водослив (6) и дырчатую перегородку (7) в горизонтальный отстойник (8).

В качестве замутнителя воды использовали ил реки Северский Донец, который брали из ковша водозабора водоочистных сооружений ПУВХ «Донец», расположенных в Харьковской области, а коагулянт служил сернокислый алюминий.

Скорость движения потока воды в модели горизонтального отстойника составила $2,58 \cdot 10^{-3}$ м/с.

Как показали эксперименты, дырчатая перегородка, установленная на выходе потока из горизонтального отстойника практически не влияет на эффективность работы горизонтального отстойника, поэтому опыты проводили с пористой полимербетонной перегородкой, либо без нее, но при одинаковых условиях. На рис. 3 представлена модель горизонтального отстойника, с установленной пористой полимербетонной перегородкой.

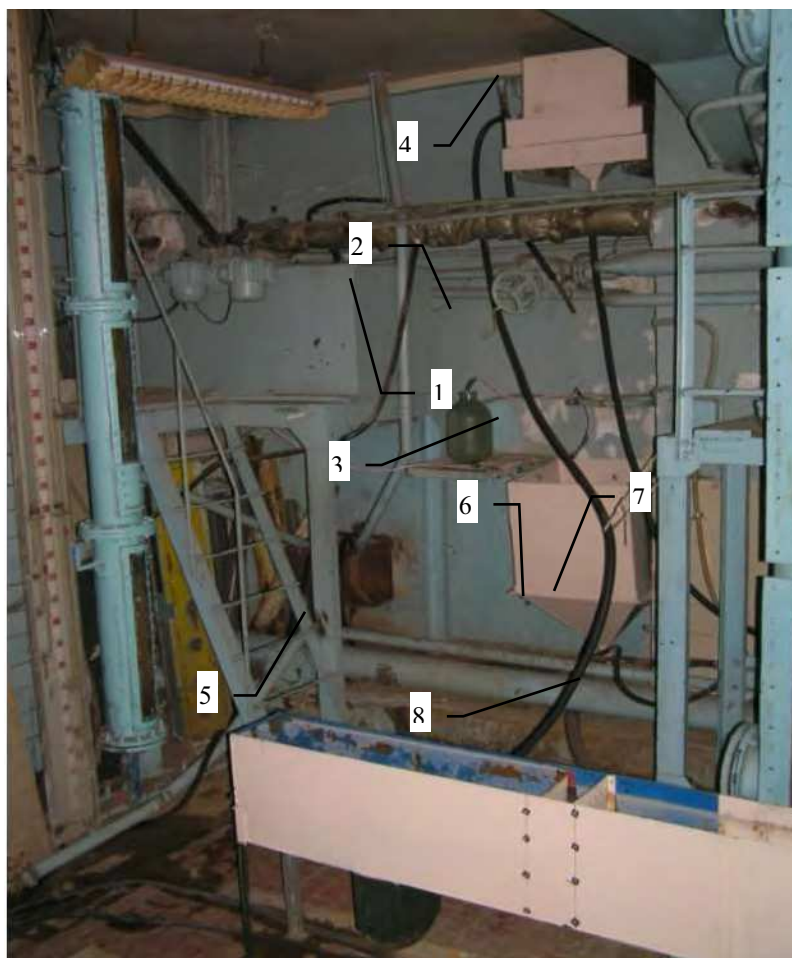


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки горизонтального отстойника
Fig. 2. The General view of the experimental installation horizontal settler

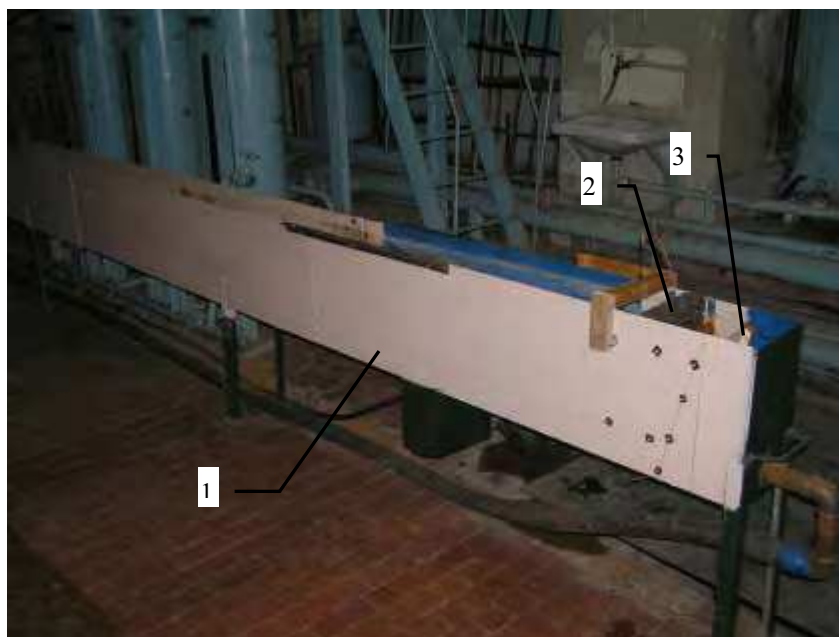


Рис 3. Модель горизонтального отстойника с установленной пористой полимербетонной перегородкой
 Fig. 3. Model horizontal settler installed porous polymer concrete wall

Из рис. 3 видно, что пористая полимербетонная перегородка (2) установлена вблизи выхода потока воды из модели горизонтального отстойника (1).

Одним из основных показателей эффективности работы горизонтальных отстойников является концентрация взвешенных веществ на выходе потока из него. Для определения эффективности работы отстойника с пористой полимербетонной перегородкой и без нее был принят коэффициент эффективности, который определяли по формуле:

$$K_{\text{э}} = \frac{C_0}{C_n},$$

где: C_0 и C_n - концентрация взвешенных веществ (мутность) в осветленной воде соответственно без пористой перегородки и при ее наличии

Для исследований было принято три пористых перегородки толщиной 60мм, но с разным диаметром гравийного заполнителя: перегородка №1 - 5÷7мм ($d_{\text{ср}}=6\text{мм}$), перегородка №2 - 7÷10мм ($d_{\text{ср}}=8,5\text{мм}$), перегородка №3 - 10÷14мм ($d_{\text{ср}}=12\text{мм}$). По результатам полученных экспериментальных данных были построены графики зависимости коэффициента эффективности от мутности исходной воды для этих трех перегородок (рис. 4).

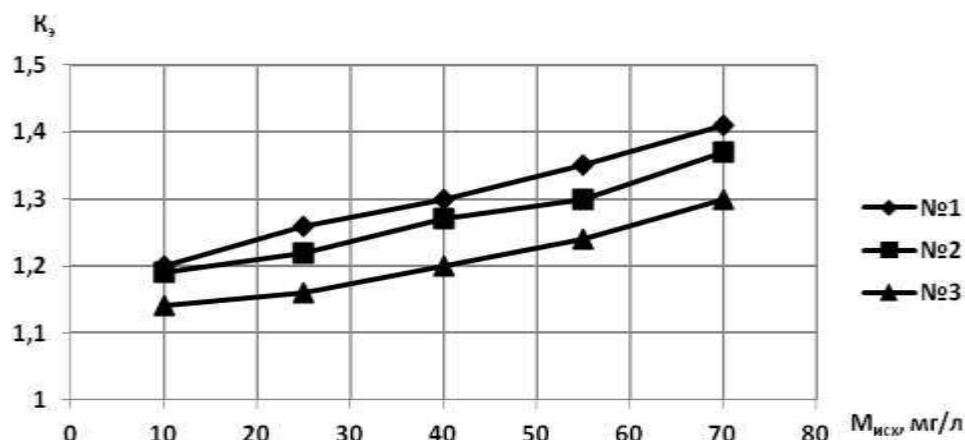


Рис.4. Зависимость коэффициента эффективности от мутности исходной воды для перегородок №1, №2, №3

Fig. 4. The dependence of the efficiency of the turbidity of raw water for the partition number 1, № 2, № 3

Из рис. 4 следует, что с увеличением диаметра гравийного заполнителя пористой перегородки уменьшается коэффициент эффективности работы горизонтального отстойника, а с увеличением мутности исходной воды он увеличивается.

Значительный интерес представляют результаты измерения глубины осадков в горизонтальном отстойнике в случаях, когда он работает без пористой перегородки (кривая №2, рис. 4) и при наличии ее (кривая №1, рис. 4). Концентрация примесей на входе в отстойник в этой серии опытов составляла $C_{вх}=80\div 85\text{мг/л}$, а средняя скорость потока – $U = 2,58 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$.

Как было указано в работах [14, 19], наличие пористой перегородки вызывает такое перестроение скоростей, при котором поле вертикальных составляющих вблизи перегородки меняет знак, а направление сил, действующих на флоккулы, совпадает с направлением силы тяжести, что обуславливает резкое повышение эффективности оседания флоккул перед перегородкой (см. кривую 1, рис. 4).

На основании экспериментальных результатов решено было определить изменение мутности воды по длине горизонтального отстойника с помощью регрессионного анализа. На входе воды в отстойник была установлена дырчатая перегородка, а на выходе пористая полимербетонная перегородка.

К исследованиям было принято три перегородки с различным диаметром гравия: первая перегородка $d=5\div 7\text{мм}$ ($d_{ср}=6\text{мм}$), вторая $d=7\div 10\text{мм}$ ($d_{ср}=8,5\text{мм}$), $d=10\div 14\text{мм}$ ($d_{ср}=12\text{мм}$).

Расстояние между переливной кромкой камеры хлопьеобразования и сборным лотком горизонтального отстойника составляло 5,3м, а расстояние между распределительной дырчатой

перегородкой и пористой полимербетонной перегородкой – 5,0м. При этом мутность воды за водораспределительной дырчатой перегородкой равнялась мутности исходной воды, а перед пористой полимербетонной перегородкой – мутности осветленной воды. Кроме исходной мутности воды и мутности на выходе во всех режимах работы измерялись мутности воды по длине отстойника 1, 2, 3 и 4м. Доза коагулянта изменялась в диапазоне от 20 до 30 мг/л при изменении исходной мутности от 10 до 70мг/л. Средняя скорость движения потока воды в горизонтальном отстойнике принималась равной 1,95мм/с и 2,58мм/с. Температура воды в экспериментах колебалась в пределах 7°C-21°C. Выбираем функцию, аппроксимирующую зависимость изменения мутности потока воды по длине горизонтального отстойника в виде:

$$M_{осв} = M(M_{исх}, D, T, d_{ср}, v, L),$$

где: $M_{осв}$ - мутность осветляемой воды, мг/л,

$M_{исх}$ - мутность исходной воды, мг/л,

D - доза коагулянта, мг/л,

T - температура осветляемой воды, °C,

$d_{ср}$ - средний диаметр гравия пористой перегородки, мм,

v - средняя скорость движения воды в горизонтальном отстойнике, мм/с,

L - координаты точки, в которой отыскивается мутность, м.

Уравнение регрессии, более полно описывающее данный процесс, может быть представлено многочленом 2 степени:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_5 \cdot x_5 + b_6 \cdot x_6,$$

где b - коэффициент уравнения регрессии,

x_1 - $M_{исх}$, x_2 - D , x_3 - T , x_4 - $d_{ср}$, x_5 - v , x_6 - L , y - $M_{осв}$.

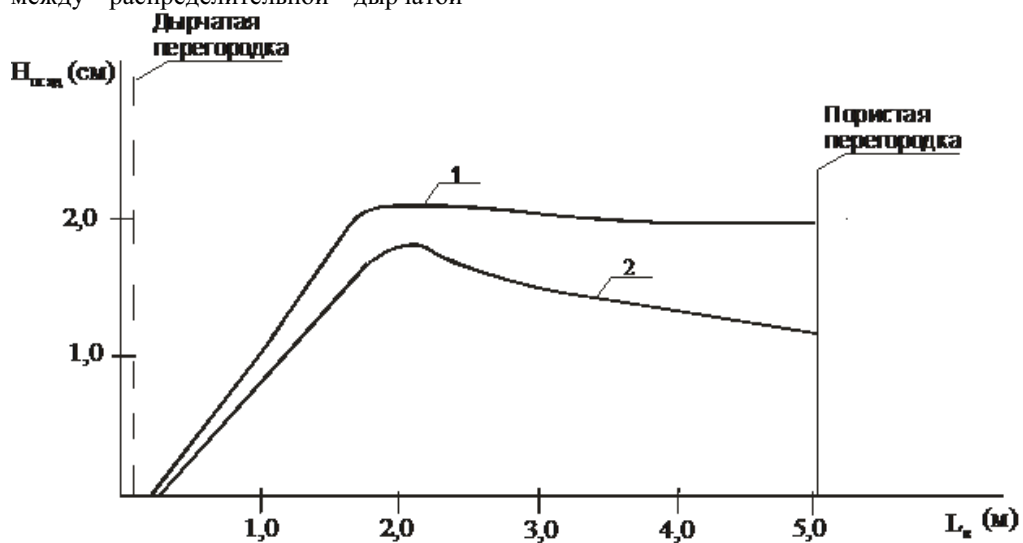


Рис.4. Отложение осадка по длине модели горизонтального отстойника

Fig.4. Sedimentation on the length of the horizontal model settler

Таблица 1. Результаты расчета
Table 1. Results of count

Регрессионная статистика						
Множественный R	0,946					
R-квадрат	0,895					
Нормированный R-квадрат	0,894					
Стандартная ошибка	5,368					
Наблюдения	450					
Дисперсионный анализ						
	df	SS	MS	F	Значимость F	
Регрессия	6	109287,57	18214,57	632,003	1,3E-213	
Остаток	443	12767,44	28,820			
Итого	449	122054,9				
	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%	Верхние 95%
Y-пересечение	18,256	11,795	1,548	0,122	-4,926	41,437
Переменная X1	0,632	0,040	15,631	3,54E-44	0,553	0,712
Переменная X2	-0,077	0,435	-0,177	0,859	-0,932	0,778
Переменная X3	-0,206	0,135	-1,528	0,127	-0,471	0,059
Переменная X4	0,116	0,103	1,127	0,260	-0,086	0,318
Переменная X5	2,116	0,803	2,633	0,009	0,537	3,695
Переменная X6	-5,705	0,179	-31,879	9,5E-117	-6,056	-5,353

Оценка адекватности выбранной модели регрессии производилась согласно правилам регрессионного анализа [2]. Коэффициенты регрессии определялись с использованием метода наименьших квадратов.

При проведении регрессионного анализа, на основании обработки 450 экспериментальных точек были получены данные (табл.1), которые близки к единице коэффициента множественной корреляции $R=0,946$ и детерминации R - квадрат= $0,895$, большое расчетное значение $F=632,003$ статистики Фишера и очень маленькое значение значимости $F=1,3 \cdot 10^{-213}$, свидетельствуют про высокую адекватность модели регрессии. Тогда искомое уравнение можно представить в виде:

$$M_{\text{осв}} = 18,256 + 0,632 \cdot M_{\text{поч}} - 0,077 \cdot D - 0,206 \cdot T + 0,116 \cdot x \\ \text{и } d_{\text{сеп}} + 2,116 \cdot v - 5,705 \cdot L$$

ВЫВОДЫ

Таким образом, теоретически и экспериментально доказано, что установка пористой полимербетонной перегородки на выходе потока воды из горизонтального отстойника повышает эффективность его работы за счет интенсификации процесса осаждения взвеси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белан А., Хоружий П., 1976. Проектирование и расчет устройств водоснабжения. Киев: Будівельник. – 207.
2. Вадзинский Р., 2008. Статистические вычисления в среде Excel. - изд. Питер.
3. Василенко О., Грабовський П., Ларкіна Г., Поліщук О., Прогульний В., 2010. Реконструкція і інтенсифікація споруд водопостачання та водовідведення: Навчальний посібник – К.: ІВНВКН «Укрґеліотех». – 272.
4. Гнедин К., 1974. Режим работы и гидравлика горизонтальных отстойников. Киев: Изд-во «Будівельник». – 223.
5. Грабовский П., Ларкина Г., 1997. Полимербетонный дренаж и интенсификации работы скорых фильтров. //Сб. «Современные технологии и оборудование для обработки воды на водоочистных станциях» - М.: Госстрой России, НИИК ВОВ, 64-67.
6. Грабовский П., Горб Ю., 2005. Пористая трубчатая конструкция для предварительной очистки воды. – Одесса: Внешрекламсервис. Вісник ОДАБА. - №19.– 119 – 123.
7. Грабовский П., Ларкина Г., Прогульний В., 2012. Промывка водоочистных фильтров. Дренаж, отвод промывной воды. – Одесса: Оптимум. – 240.

8. Журба М., Соколов Л., Говорова Ж., 2004. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений. – в 3-х т. – 2-е изд. – М.: АВС.
9. Коринько І., Понасенко Ю., 2012. Інноваційні технології водо- підготовки. Харків: ХНАМГ.– 208.
10. Кульский Л., Строкач П., 1981. Технология очистки природных вод. – Киев: Высшая школа. Главное изд-во.– 328.
11. Лапшов Н., 1980. Гидравлическое моделирование. Учебное пособие. Ленинград.– 72.
12. Леви И., 1960. Моделирование гидравлических явлений. М.: Госэнергоиздат.– 320.
13. Николадзе Г., 1987. Технология очистки природных вод. Учебник для вузов. – М.: «Высшая школа». — 479.
14. Пат.87321 Україна, МПК С02F1/00. Високоєфективний горизонтальний відстійник водоочисних споруд/ Токар Й.Я, Сухоруков Д.Г., заявник та власник Товариство з обмеженою відповідальністю "Фірма "Гідромеханіка"- №а200700897, заявл.29.01.2007, опубл.11.08.2008р. Бюл. №15. – 4.15
15. Пат. 102650 Україна, МПК С02 F1/52. Горизонтальний відстійник./ Эпоян С.М, Сухоруков Д. Г, заявник та власник ХНУБА-№ а 2012 07889, заявл. 25.07.2013, опубл. 25.07.2013. Бюл. №14 – 4.
16. Роуч П., 1980. Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир. – 616 .
17. СНиП 2.04.02 – 84., 1985. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. – М.: Госстройиздат.– 239.
18. Сухоруков Д., 2011. Моделювання горизонтальних відстійників з пористою полімербетоною перегородкою. // Науковий вісник будівництва. Харків. ХДТУБА. ХОТВАБУ. Вип. 63 – 442 – 445.
19. Токарь И., Сухоруков Д., Рязанцев А., 2008. Решение задачи гидромеханики потоков в горизонтальном отстойнике водоочистных сооружений с пористой перегородкой. // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА. – Вип.50. – 146-154.
20. Тугай А., Орлов В., 2001. Водопостачання: Підручник для вузів – Рівне. РДТУ.– 429.
21. Шлихтинг Г., 1974. Теория пограничного слоя: Пер. с нем. – М.: Наука. – 711.
22. Эпоян С., Сухоруков Г., Друшляк О., Шилин В., 2001. Водопостачання (очистка природних вод). Навч. Посібник. – Х.: Основа.– 191.
23. Эпоян С., Колотило В., Друшляк О., Сухоруков Г., Айрапетян Т., 2010. Водопостачання та очистка природних вод. Навч. Посібник. – Х.: Фактор.– 192.
24. Эпоян С., Сыроватский А., Бабенко С., 2013. Движение суспензии в тонкослойном элементе усовершенствованной конструкции. MOTROL – Commission of motorization and energetic in agriculture. – Lublin – Rzeszow. – Volume 15, №6. – P. 43-50.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCHES OF HORIZONTAL SUMP WITH POROUS WALL

Summary. The results of theoretical and experimental researches show the effectiveness of horizontal sump with a porous polymer concrete wall.

Key words: horizontal sump, mortar porous partition, coefficient of efficiency

ОБРАБОТКА ПАРАМЕТРОВ ЧАСТИЦ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ПРИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ 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 обоснован выбор оптической схемы для определения электрокинетического дзета-потенциала и гидромеханических параметров частиц, находившихся в водных растворах. Использование разработанных оптических схем интенсифицирует работу оборотных систем водоснабжения за счёт повышения уровня автоматизации и контроля качества очистки сточных вод.

Ключевые слова: гидромеханические параметры частиц, оборотные системы водоснабжения, оптические методы лазерной доплеровской интерферометрии, дисперсные частицы, эффективный диаметр, электрокинетический дзета – потенциал, концентрация частиц.

ВВЕДЕНИЕ Рыночные условия хозяйственной деятельности являются определяющим фактором во всех сферах производственной деятельности промышленных предприятий. Составной частью производственного процесса большинства промышленных предприятий являются оборотные системы водоснабжения, которые, в свою очередь, зависят от используемой в них воды для различных технологических целей.

Вода - ценнейший природный ресурс. Она играет исключительную роль в процессах обмена веществ, составляющих основу жизни. Огромное значение вода имеет в промышленном и сельскохозяйственном производстве. Общеизвестна необходимость её для производственных и технологических потребностей, а также в хозяйственной деятельности, работе коммунального сектора.

Жёсткие условия проектирования и работы оборотных систем водоснабжения определяют уровень контроля в водных растворах параметров частиц твёрдой фазы, электрокинетического потенциала и других гидромеханических параметров. Поэтому для надёжной и эффективной работы оборотных систем водоснабжения, кроме технологически рациональных способов очистки и обезвреживания сточных вод промышленных предприятий, необходимо использование способов управления процессами контроля основных технологических режимов и параметров, связанных с определением качества очистки сточных вод.

ОБОСНОВАНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ - Определённые пути интенсификации работы оборотных систем водоснабжения направлены на решение несколько взаимосвязанных между собой задач. Одним из таких действенных рычагов повышения интенсификации работы оборотных систем водоснабжения является контроль качества очистки сточных вод [1, 2, 3, 4].

Использование различных типов контрольно-измерительных приборов для определения и регулирования качественно-количественных показателей обработки сточных вод промышленных предприятий позволяет решить народно-

хозяйственную проблему, которая состоит в снижении себестоимости очистки сточных вод за счёт интенсификации работы оборотных систем водоснабжения при оценке качественных показателей очистных сооружений.

Актуальной задачей повышения интенсивности работы оборотных систем водоснабжения является разработка и использование современных методов контроля качества сточных вод промышленных предприятий за счёт определения электрокинетического дзета-потенциала и других гидромеханических параметров частиц водных растворов. Например, таких, как эффективный диаметр, электрофоретическая скорость движения частицы, время нарастания амплитуды доплеровского сигнала. Перечисленные параметры оптимизировались с целью повышения интенсивности работы оборотных систем водоснабжения в целом и отдельных её составляющих.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ - Процесс очистки сточных вод промышленных предприятий подвергается постоянному контролю на всех этапах выполнения технологических операций. Контроль работы оборотных систем водоснабжения осуществляется, начиная от забора воды из источников (или системы) водоснабжения, продолжается в самом оборудовании после каждой ступени обработки и заканчивается общей оценкой качества очистки сточных вод.

Средства оперативного контроля технологических операций составляют основу информационной системы и являются базой для разработки и усовершенствования отдельных систем автоматического регулирования [5]. Номенклатура и объём промышленного производства этих средств определяют уровень автоматизации на водоочистных станциях. Задача заключается в том, чтобы автоматически контролировать наибольшее число технологических параметров [6].

К области экологических исследований, кроме прямых средств и технологических мероприятий, необходимо отнести косвенные методы, которые разрешают определять отдельные параметры или комплекс гидромеханических параметров. Из-

вестные раньше оптические способы определения параметров частиц водных растворов не в полной мере отвечали поставленной задаче. Поэтому в объеме выполнения исследований, связанных с методикой расчета гидромеханических параметров частиц водных растворов, в зависимости от формы доплеровского сигнала предложено математическое моделирование процесса измерения и анализа полученных экспериментальных результатов.

Автоматические приборы позволяют не только осуществлять постоянный контроль за составом сточных вод на любой стадии очистки, но и осуществлять автоматическое регулирование процесса очистки сточных вод [6, 7].

Определение основных параметров электрокинетических явлений, гидромеханических характеристик частиц водных растворов является основой для создания систем управления и контроля технологических процессов работы оборотных систем водоснабжения. Электрокинетические явления в дисперсной системе связаны с двойным электрическим слоем, который определяет характер подвижности частиц твердой фазы, гидромеханические параметры частиц, к которым относятся: эффективный диаметр, электрический дзета-потенциал и др.

При исследовании частиц твердой фазы водных растворов широко используются оптические методы. К ним относятся микроскопы, нефелометры, кондуктомеры и др.

Для изучения дисперсных частиц растворов ($D > 0,2$ мкм) обычно используются методы оптической микроскопии. Разработан ряд приборов и методов для микроскопического определения электрофоретической скорости и электрокинетического дзета-потенциала частиц [8 – 12].

Используемые теневые методы основываются на получении изображения плотностных неоднородностей прозрачной среды в результате преломления световых лучей. Их недостатками являются низкий порог чувствительности, сложность приборного оборудования и невысокая точность, что ограничивает их применение в промышленном производстве. Например, при оценке качества очистки сточных вод, когда диаметр частиц находится в пределах 10 ... 150 мкс.

В последнее время в различных отраслях техники и хозяйственной деятельности, фармацевтической промышленности, медицине широко используются методы интерферометрии. Принцип действия интерферометрических систем основан на измерении разности хода двух лучей — опорного и рабочего. Сущность этого метода состоит в том, что при прохождении светового потока через оптическую неоднородность наряду с локальным отклонением световых лучей происходит изменение их фазы, т. е. изменение оптической длины пути, который проходит световой луч. Это изменение фазы можно измерить только с помощью

интерференционных методов, которые обладают высокой чувствительностью, большим быстродействием и широким динамическим диапазоном.

Приборы для определения качественных показателей очистки воды являются приборами целевого назначения и изготавливаются лишь небольшими сериями, а иногда и в единичных экземплярах [19]. Такой подход является наиболее приемлемым для широкого многообразия сточных вод промышленных предприятий, который позволяет обеспечить эффективную обработку практически всех сточных вод, образующихся в промышленном секторе нашей страны.

В Таврическом агротехнологическом университете разработаны оптические схемы, лабораторное оборудование и установки [13] с использованием методов лазерной доплеровской интерферометрии, которые позволяют определять скорость движения частиц $10^{-5} \dots 10^2$ м/с и диаметр частиц 10 ... 500 мкс. При этом расстояние до объекта исследования в зондируемой зоне находится в диапазоне 10 ... 1000 мм, а размеры составляют 0,01 ... 1,0 мм.

Разработанные оптические методы [14 - 17] работают, используя эффект Доплера, и с помощью источника светового излучения, зеркал, линзы, светового делителя формируют световые пучки, создавая условия для определения электрокинетического дзета-потенциала и гидромеханические параметры частиц, находящихся в водных растворах. В самом общем случае система разработанных оптических способов лазерной доплеровской интерферометрии иллюстрируется блок – схемой, представленной на рис. 1.

Для измерения эффективного диаметра и концентрации частиц, находящихся в водных растворах, создан блок, в котором исследуемый раствор отводится от направления подачи сточных вод на очистку и после очистки, и эталонный раствор, имеющий соответствующую концентрацию n_0 , располагающиеся в одном блоке. С помощью зеркал, светового делителя формируют два когерентных световых пучка, которые с помощью линзы фокусируются под углом α один к другому в зондируемую зону измерительной ячейки. Угол α по которому в зондируемую зону направляются в измерительную ячейку зондируемые пучки, определяется по формуле:

$$\alpha = 2 \cdot \arctg \frac{H}{2 \cdot F}, \quad (1)$$

где: H - расстояние между двумя лазерными когерентными пучками,

F - фокусное расстояние линзы, м.

Вначале определяют количество импульсов K_0 доплеровского сигнала в единицу времени, затем период T и время t увеличения амплитуды доплеровского сигнала. С учётом полученной информации рассчитывают эффективный диаметр D частицы, их концентрацию n с использованием следующих формул:

$$D = \frac{\lambda \cdot t}{2 \cdot T \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} = \frac{\lambda \cdot t \cdot F}{T \cdot H}, \quad (2)$$

$$n = \frac{K}{K_0} \cdot n_0, \quad (3)$$

где λ - длина волны излучения лазера в исследуемом растворе [14].

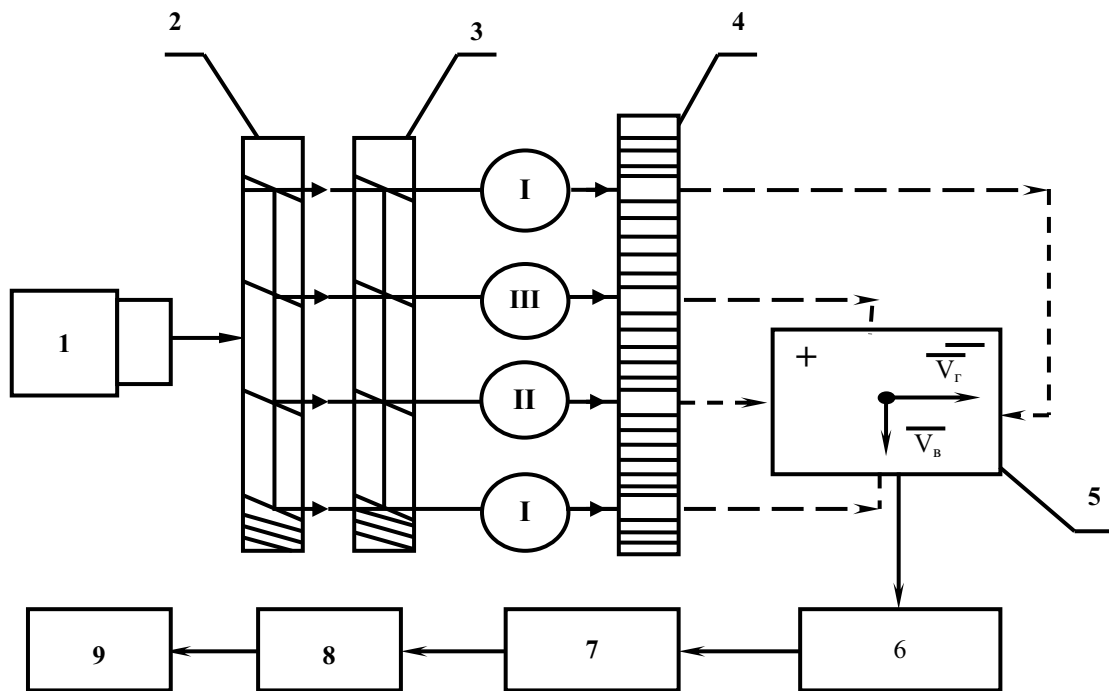


Рис. 1 – Блок-схема оптических способов для определения гидромеханических параметров частиц водных растворов: 1 – источник света, 2 – система зеркал, 3 – линза, 4 – делитель светового потока, 5 – электрофоретическая ячейка, 6 – фотоприёмник, 7 – осциллограф, 8 – счётчик импульсов, 9 – персональный компьютер, I, II, III, IV – каналы

Fig. 1 – Flow chart of optical methods for defining of hydraulic and mechanical parameters of water solutions particles: 1 – light source, 2 – system of mirrors, 3 – lens, 4 – light beam divider, 5 – electrophoresis cell, 6 – photoreceiver, 7 – oscillograph, 8 – pulse counter, 9 – personal computer, I, II, III, IV – channels :

Использование разработанного блока для измерения эффективного диаметра и количества частиц позволяет производить измерения определённых параметров на действующем технологическом оборудовании, что расширяет функциональные возможности оборудования. Осуществление такого способа возможно путём сравнения двух растворов: исследуемого и эталонного.

В соответствии с разработанным устройством для измерения скорости частиц водных растворов, который содержит световой делитель, зеркал и линзы формируют два световых пучка, расположенных под углом α . Величина угла между лазерными лучами определяется по формуле:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{H}{2 \cdot F}, \quad (4)$$

где: H - расстояние между двумя лазерными лучами, м,

F - фокусное расстояние линзы, м.

Автоматически в реальном времени определяют период T доплеровского сигнала и вычисляется скорость \mathcal{G} частицы по формуле:

$$\mathcal{G} = \frac{\lambda}{2 \cdot T \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (5)$$

где: λ - длина волны излучения лазера в водном растворе, мкм [15].

Использование устройства для определения скорости осуществляется путём изменения расстояния H между светоделителем и зеркалом, что приводит к изменению угла α между двумя зондирующими лучами. Использование аналого-цифрового преобразователя и демодулятора расширяет функциональные возможности оборудования и смену чувствительности прибора.

Способ определения скорости частицы в водном растворе при электрофорезе осуществляется с помощью формирования второго измерительного канала. Использование лазера, системы зеркал и линзы освещают частицу, находящуюся на расстоянии l от предыдущего положения частицы в электрофоретической камере. Регистрируют интенсивность светового потока частицею, которая движется со скоростью v_2 . Автоматически в режиме реального времени определяют

частоту ν_2 второго доплеровского сигнала и время t между двумя доплеровскими сигналами, определяют мгновенную скорость U_2 частицами в другом положении и среднюю скорость U с использованием следующих формул:

$$\nu_2 = \frac{\lambda \cdot \nu_2}{2 \cdot \sin \frac{\alpha_2}{2}}, \quad (6)$$

где: α_2 - угол между двумя лучами для второго измерительного канала, град. [16],

$$U = \frac{l}{t}. \quad (7)$$

Использование аналого-цифрового преобразователя и персональной электрической вычислительной машины создаёт условия для измерения параметров в реальном времени. Таким образом, расширяются функциональные возможности рассмотренного способа измерения скорости частиц водных растворов при электрофорезе в режиме реального времени.

Для измерения концентрации частиц водных растворов формируются два когерентных световых пучка, которые фокусируются под углом α один к другому в измерительную ячейку. Регистрация интенсивности света осуществляется фотоприёмником, выход с которого электрически связан с цифровым запоминающим осциллографом и счётчиком импульсов доплеровских сигналов. Использование двух ячеек: исследуемой и с эталонным или буферным раствором, для измерения параметров позволяет определять периоды T_1 та T_2 доплеровских сигналов и количество доплеровских импульсов K_1 та K_2 , что является основой для расчёта скоростей ν_1 и ν_2 и концентрации частиц n_1 и n_2 примесей до и после очистки последующим формулам:

$$\nu_1 = \frac{\lambda}{2 \cdot T_1 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} \quad \nu_2 = \frac{\lambda}{2 \cdot T_2 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (8)$$

$$n_1 = \frac{k_1}{\nu_1}, \quad n_2 = \frac{k_2}{\nu_2}, \quad (9)$$

где: λ - длина волн излучения гелий-неонового лазера [17 – 13].

Качество C (степень) очистки сточных вод определяется отношением концентрации n_1 частиц до очистки к концентрации n_2 частиц в растворе после очистки [17]:

$$C = \frac{n_1}{n_2}. \quad (10)$$

Разработанный способ контроля качества очистки сточных вод обеспечивает точность из-

мерения концентрации частиц примесей в водных растворах.

Использование разработанных способов и технологических решений повышает надёжность приборного оборудования, которая возможна даже при переменной проводимости (мутности) водного раствора. Кроме этого обеспечивается мобильность в определении параметров частиц водных растворов, состоящую в готовности к установке и определению без регулировки и автоматической настройки чувствительности.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ И ЕЁ АКТУАЛЬНОСТЬ - При разработке, проектировании и эксплуатации локальных схем очищения производственных сточных вод важное место занимают технологии контроля качества очищения и измерение параметров частиц примесей, входящих в состав сточных вод. Методы лазерной доплеровской интерферометрии обеспечивают определение скорости, эффективного диаметра, электрокинетического потенциала и концентрации частиц примесей водных растворов дистанционно, в режиме реального времени с достаточно высокой точностью [1 - 3].

Вместе с тем возможности автоматизации несколько ограничены. Особенно ощутима эта ограниченность при использовании типичных схем автоматизации и при неблагоприятных динамических характеристиках узла реагентной обработки [22].

Представленный анализ работы приборного оборудования, используемого для определения параметров частиц, находящихся в водных растворах, в процессах электрофореза и седиментации, отстаивания и флотации, обработке вод с использованием коагулянтов, и определяет сущность поставленной проблемы, состоящей в разработке надёжных и эффективных способов при определении качественного состава обработки сточных вод.

Причинами существования рассмотренной проблемы являются следующие условия: невысокая эффективность управления процессом определения дзета-потенциала, эффективного диаметра и др. параметров.

Негативными последствиями не решения поставленной проблемы являются загрязнение водных объектов страны, увеличение антропогенного влияния на окружающую среду вообще и на водные объекты страны конкретно.

Пути решения поставленной проблемы состоят в решении организационно-технических мероприятий (разделение состава сбрасываемых сточных вод, использование высокоэффективных способов интенсификации работы оборотных систем водоснабжения, а также эколого-экономических и социальных мероприятий (уменьшение уровня нагрузки на водные объекты, предотвращение загрязнения окружающей среды и др.)

Комплексное решение поставленных проблем в работе оборотных систем водоснабжения определяет научно-прикладную задачу, состоящую в определении электрокинетического потенциала и гидромеханических параметров частиц водных растворов, которая подчёркивает актуальность проведенных научно-исследовательских работ. Техническое обеспечение последних научных разработок поднимает на новый уровень работу оборотных систем водоснабжения в части интенсификации их работы.

Причинами существования поставленной проблемы являются: отсутствие комплексного подхода к работе оборотных систем водоснабжения, повышение уровня их интенсификации и отсутствие условий обеспечения надёжности отдельных составляющих технологического процесса.

Научно-прикладная проблема состоит в установлении математических зависимостей между гидромеханическими параметрами частиц водных растворов при исследовании процесса оценки качества очистки сточных вод промышленных предприятий.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ - Для повышения уровня интенсификации процесса оценки качества сточных вод при электрофорезе и седиментации необходимо определять гидромеханические параметры частиц водных растворов.

Целью работы является повышение уровня интенсификации работы оборотных систем водоснабжения за счёт разработки эффективных оптических схем лазерной интерферометрии.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Определить гидромеханические параметры, влияющие на эффективность очистки сточных вод в процессах электрофореза и седиментации частиц водных растворов.

2. Разработать методику математического расчёта и провести обработку полученных результатов экспериментальных исследований изменений эффективного диаметра в зависимости от времени нарастания амплитуды доплеровского сигнала.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ - Известно, что вода как полярный растворитель является не просто инертной средой, в которой могут быть растворены различные вещества, но и матрицей, накладывающей значительный отпечаток своих свойств на физико-химические свойства образующейся гомогенной системы. Некоторые авторы указывают на двухпольную модель гидратации. В структуре разбавленных электролитов, которые являются моделями природных пресных вод, некоторые исследователи [18], различают три слоя воды. При этом у каждого положительного или отрицательно гидратирующего иона образуется слой первичной гидратации, второй слой находится под ориентирующим влиянием кулоновского поля иона, частично экранированного

предыдущим слоем и свободных молекул последующего слоя [19].

Кроме того, частицы коллоидных растворов находятся в непрерывном хаотическом движении, они постепенно передвигаются от мест с большей концентрацией к местам с меньшей концентрацией, т. е. им присущи свойства диффузии. В связи со значительными размерами коллоидных частиц истинных растворов высокомолекулярных соединений скорость их диффузии во много раз меньше скорости диффузии молекул в реальных условиях [20].

В гетерогенных дисперсных системах, а к таким относятся большая часть сточных вод промышленных предприятий, на границе раздела между фазами обычно возникает электрический потенциал. Его возникновение осуществляется двумя путями. Первый путь возникновения потенциала связан с адсорбцией потенциалопределяющих ионов. Возникновение потенциала этим путём происходит в том случае, когда в дисперсной среде содержатся ионы, входящие в состав частиц твёрдой фазы. Второй путь возникновения потенциала заключается в том, что поверхностные молекулы частиц твёрдой фазы диссоциируют в данной жидкой среде на ионы: один из ионов переходит в диспергированную среду, а на поверхности остается ион противоположного знака [20].

Также известно, что на двойной электрический слой оказывает влияние тот факт, что ионы наружной обкладки находятся под действием двух противоположно направленных сил. Первая сила - электростатическое притяжение противоположно заряженной поверхности твёрдой фазы, вторая сила обусловлена тепловым движением противоположно заряженных ионов, стремящихся оторвать их от поверхности и распределить равномерно по всему объёму жидкости [20, 21].

С учётом выше изложенного можно предположить, что с увеличением размеров частиц водных растворов силы электростатического притяжения и сила теплового движения этих противоположно заряженных ионов будет увеличиваться. Поэтому частицы большего диаметра, находящиеся в водных растворах, будут определяющим фактором.

Однако, надо иметь в виду, что частиц большего диаметра в водных растворах не всегда будет большее количество по численности. Это обусловлено составом сточных вод, поступающих на очистку, выбранной технологией их обработки или нейтрализации, механизмом образования частиц водного раствора, наличием и величиной сил притяжения и др.

Поэтому, определение электрокинетического дзета-потенциала, диаметра, электрофоретической скорости частиц, находящихся в водных растворах, представляется важной задачей, имеющей прикладной характер.

:

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований определения эффективного диаметра частиц водных растворов

Table 1. The results of experimental researches for the definition of effective diameter of water solutions particles

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Измеренный диаметр частицы $D, 10^{-6}, \text{ м}$	4,92	9,95	14,76	18,56	23,25	28,56	34,06	36,58	42,34	49,40
	4,87	9,42	14,18	18,38	24,06	28,73	33,78	37,23	43,56	48,78
	4,89	9,40	14,32	17,32	24,52	27,78	33,56	38,45	47,28	49,04
	4,78	9,56	14,67	19,01	23,87	24,06	34,45	39,05	49,03	48,39
Диаметр (округлённый), $D_{\text{ОКР}}, 10^{-6}, \text{ м}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50

Определяя потенциал и гидродинамические параметры частиц, исследователи получают действенный инструмент для управления и регулирования сложными физико-химическими процессами, происходящими при очистке сточных вод, нейтрализации вредных компонентов и т. п.

Величина электрокинетического ξ дзета – потенциала определяется по формуле Смолуховского:

$$\xi = \frac{3 \cdot \eta \cdot \nu}{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E}, \quad (11)$$

где: ε - относительная диэлектрическая проницаемость, η - вязкость жидкости, E - напряженность электрического поля, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф / м}$ - электрическая постоянная.

Из приведенной формулы (11) видно, что одним из параметров, определяющих величину электрокинетического потенциала, является электрофоретическая скорость. Эффективный диаметр напрямую зависит от электрофоретической скорости, что и является определяющим при обработке полученных экспериментальных зависимостей.

Эффективный диаметр каждой частицы водного раствора при электрофорезе определяется по формуле:

$$D = t_1 \cdot \nu_1 \cdot \cos \alpha, \quad (12)$$

где: ν_1 - электрофоретическая скорость, м/с, t_1 - время увеличения амплитуды доплеровского сигнала, сек, α - угол между двумя пучками измерительной установки, град.

Обработка полученных результатов лабораторных исследований осуществляется в такой последовательности:

1. Для каждого значения повторностей измеренного эффективного диаметра D_0 необходимо вычислить среднеарифметическое значение по результатам проведенных измерений, которые определяются по формуле:

$$D_{\text{нр.д.д.}} = \frac{D_{H1} + D_{H2} + \dots + D_{Hn}}{n} \quad (13)$$

где: $D_{\text{нр.д.д.}}$ - среднеарифметическое значение диаметра, $D_{i1}, D_{i2}, \dots, D_{in}$ - значение диаметров

по вариантам, определяемых путём опытов, n - общее число вариантов данной совокупности.

2. Отклонение Δ среднеарифметического значения, полученное по результатам измерений величины диаметра D_0 , а также который получен в результате измерений и определения средней величины $D_{\text{ср.д.д.}}$, определяем по формуле:

$$\Delta = D_{\text{ср.д.д.}} - D_0. \quad (14)$$

3. Вариации η результатов измерений, полученных линейных размеров (диаметров), значений между самым большим и самым маленьким, которые соответствуют одному блоку диапазона измерений, для одного и того же измерения результат которого определяется по формуле:

$$\eta = D_{\text{max}} - D_{\text{min}}. \quad (15)$$

4. Далее необходимо выбрать значение самой большей погрешности и вариации.

По выбранным значениям абсолютной систематической погрешности и большего значения вариации необходимо сделать вывод о том, что находятся данные величины в поле допустимых погрешностей процесса измерения и определения гидромеханических параметров частиц водных растворов.

5. Сумма квадратов между расчётным и округлённым диаметрами для каждого ряда определяется по формуле:

$$\sum_{i=1}^n (D_{\text{д.д.д.}} - D_{\text{р.д.д.}})^2. \quad (16)$$

6. Величину среднеквадратического отклонения σ экспериментальных данных от результатов теоретических исследований определяют по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_{\text{расч.}} - D_{\text{оним.}})^2}{n-1}}. \quad (17)$$

Таким образом, максимальное среднеквадратическое отклонение экспериментальных и теоретических результатов равно $\sigma_{\text{MAX}} = 0,0071 \text{ м}$, а минимальное среднеквадратическое отклонение - $\sigma_{\text{MIN}} = 0,00425 \text{ м}$.

Результаты математической обработки экспериментальных исследований представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты математической обработки полученных измерений эффективного диаметра

Table 2. The result of mathematical processing of received data after effective diameter measurement

№ серии	Округлённый диаметр частицы, мм	Диаметр частицы, D, мкм				Среднеарифметическое значение эффективного диаметра, мкм	Среднеарифметического отклонения Δ	Вариации η	Среднеквадратического отклонения σ
		1	2	3	4				
1.	5	4,95	4,90	5,00	4,95	4,95	0,05	0,1	0,071
2.	10	9,95	9,90	9,85	9,90	9,9	0,1	0,1	0,015
3.	15	14,90	14,95	15,00	15,00	14,9625	0,0375	0,1	0,00417
4.	20	19,95	19,95	20,00	19,90	19,95	0,05	0,1	0,00425
5.	25	24,90	24,95	24,95	25,00	24,95	0,05	0,1	0,005
6.	30	29,90	29,90	29,95	29,90	29,9125	0,0875	0,05	0,01083
7.	35	34,85	34,90	34,95	34,95	34,9125	0,0875	0,1	0,0125
8.	40	39,95	39,90	39,85	40,00	39,925	0,075	0,15	0,00867
9.	45	44,90	44,95	45,00	45,00	44,9625	0,0875	0,1	0,004167
10.	50	49,80	49,85	50,00	49,90	49,8875	0,0125	0,15	0,0242

Для связи с другими гидродинамическими параметрами частиц водных растворов вычисления электрофоретической скорости движения частицы и времени нарастания амплитуды доплеровского сигнала выполним по следующим формулам.

1. Уточняем действительное значение электрофоретической скорости движения частицы по формуле:

$$v = 2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E \cdot \frac{\zeta}{3 \cdot \eta}, \quad (18)$$

где: ε_0 - электрическая постоянная, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф / м, ε - относительная диэлектрическая постоянная жидкости, η - вязкость жидкости, E - напряжённость электрического поля,

2. Время нарастания амплитуды доплеровского сигнала определяем по формуле:

$$t_1 = \frac{x_1}{V} = \frac{D}{V \cdot \cos \alpha / 2}. \quad (19)$$

где: \tilde{O}_1 - расстояние до максимального увеличения величины эффективного диаметра, м, V - электрофоретическая скорость, м / с, $\cos \alpha$ - угол между двумя зондирующими пучками, град., D - эффективный диаметр, мкм.

Результаты определения времени увеличения амплитуды доплеровского сигнала (мс), при значениях электрофоретической скорости движения частицы (м / с), находящихся в диапазоне $v = 0,35 \div 0,40$ м / с, при этом угол между двумя зондируемыми пучками изменяется. Использование разработанной математической программы

позволяет определить из каждой серии опытов среднюю величину, которая сравнивается с округлённым диаметром для каждой серии. Затем определяется величина среднеарифметического отклонения Δ и вариации η .

Определенная сумма квадратов между расчётным и округлённым диаметрами для каждого ряда позволяет определить величину среднеквадратического отклонения σ . При этом максимальное среднеквадратическое отклонение экспериментальных и теоретических результатов равно $\sigma_{\text{MAX}} = 3,825 \cdot 10^{-6}$ м - для диаметров, не превышающих $30 \cdot 10^{-6}$ м, а минимальное среднеквадратическое отклонение - $\sigma_{\text{MIN}} = 0,167$ м - для диаметров, не превышающих $5 \cdot 10^{-6}$ м.

Графические зависимости, определяющие время нарастания амплитуды доплеровского сигнала t_1 , (мс) от величины измеренного диаметра частицы (D, 10^{-6} , м) водного раствора представлены на рис. 2.

Представленные графические зависимости (рис. 2) наглядно демонстрируют, что величины эффективного диаметра определяются путем измерения экспериментальных значений. Величины, которые незначительно отклоняются на уровне $t_1 = 0,85 \dots 0,90$ мс времени амплитуды доплеровского сигнала, носят случайный характер. Второй уровень $t_1 = 1,20 \dots 1,40$ мс указывает на то, что, достигая максимального значения, величина доплеровского сигнала соседних частиц начинает существенно влиять на процессы определения гидромеханических параметров частиц.

Таблица 3. Изменение времени нарастания амплитуды доплеровского сигнала
Table 3. The changes in time of raising of the Doppler signal amplitude

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Угол между двумя зондируемыми пучками $\cos \alpha = 5^0 = 0,996$										
Электрофоретическая скорость движения частицы $v = 0,35 \div 0,40$ м / с										
Время нарастания амплитуды доплеровского сигнала t_1 , мс	0,15	0,3	0,43	0,6	0,7	0,9	1,007	1,15	1,29	1,43

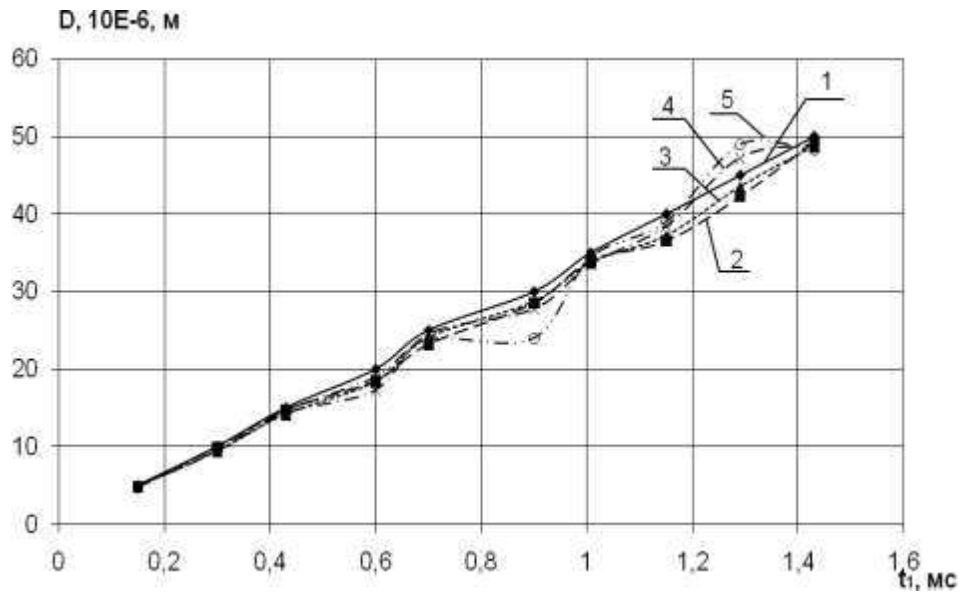


Рис. 2. Зависимость времени нарастания амплитуды доплеровского сигнала t_1 , (мс) от величины измеренного диаметра частицы ($D \cdot 10^{-6}$, м) водного раствора: 1, 2, 3, 4 - повторности измерения величины эффективного диаметра, 5 – средняя величина диаметра, определённая в результате расчётов

Fig. 2. Dependence of time of the Doppler signal amplitude raising t_1 (msec) on the measured particle diameter ($D \cdot 10^{-6}$, m) of the water solution: 1, 2, 3, 4 are repeated measurements of the effective diameter, 5 is the average diameter defined after calculations

Обусловлено это тем, что интенсивность их движения, находящаяся в ограниченном пространстве, перекрывается расположением – траекториями соседних частиц. Усложняется этот процесс тем, что

размеры большинства частиц, главным образом, диаметрами свыше $D = (60 \dots 80) \cdot 10^{-6}$ м затрудняют их оценку.

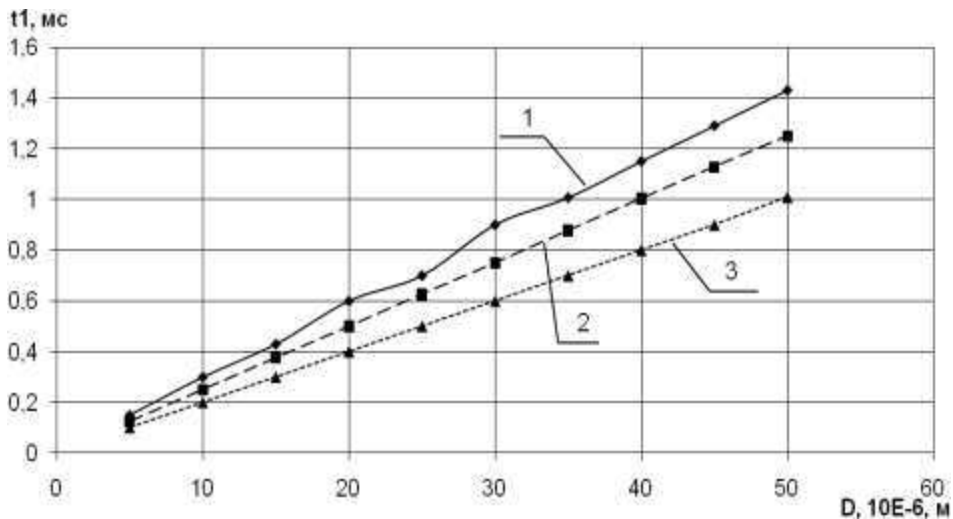
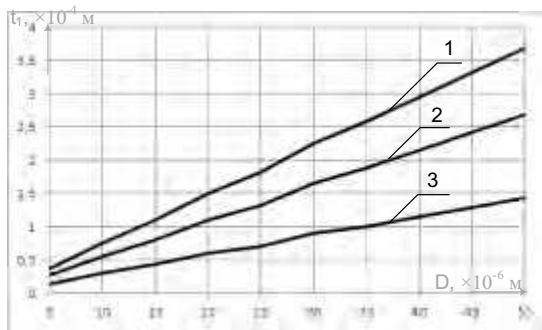


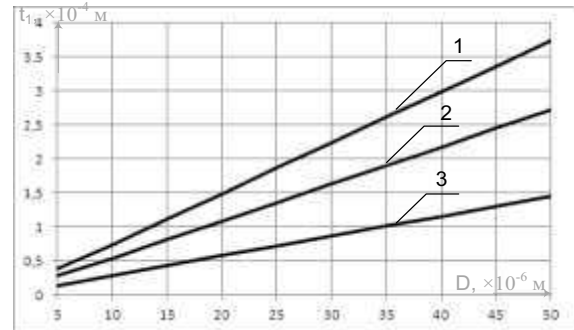
Рис. 3. Зависимость величины эффективного диаметра от времени увеличения амплитуды доплеровского сигнала с учётом обработанной величины среднего значения. Величина угла α между двумя зондируемыми пучками и электрофоретической скорости движения частицы составляет: 1 - $\cos \alpha = 5^0 = 0,996$ и $v = 0,35 \div 0,40$ м / с, 2 - $\cos \alpha = 5^0 = 0,996$ и $v = 0,4 \div 0,45$ м / с, 3 - $\cos \alpha = 5^0 = 0,996$ и $v = 0,45 \div 0,5$ м / с

Fig. 3. Dependence of the effective diameter value on the time of raising of the Doppler signal amplitude considering processed mean value. The angle between two sounded beams and electrophoretic rate the particles movement is: 1 - $\cos \alpha = 5^0 = 0,996$ and $v = 0,35 \div 0,40$ meters per second, 2 - $\cos \alpha = 5^0 = 0,996$ and

$v = 0,4 \div 0,45$ meters per second, 3 - $\cos \alpha = 5^\circ = 0,996$ and $v = 0,45 \div 0,5$ meters per second



$\cos 5^\circ = 0,996$



$\cos 10^\circ = 0,9848$

Рис. 4 Зависимость амплитуды увеличения величины доплеровского сигнала ($t_1 \cdot 10^{-4}$ мс) от величины эффективного диаметра ($D \cdot 10^{-6}$ м), когда угол между лучами установки изменяется от 5° до 30° , при различных значениях скорости движения частицы:

1 - $V = 0,35 - 0,40$ м / с, 2 - $V = 0,40 - 0,45$ м / с, 3 - $V = 0,45 - 0,50$ м / с

Fig. 4 Dependence of the Doppler signal amplitude ($t_1 \cdot 10^{-4}$ ms) on the effective diameter ($D \cdot 10^{-6}$ m), when the angle between the beams is varied 5° to 30° , under different particle movement rates: 1 - $V = 0,35 - 0,40$ m / s, 2 - $V = 0,40 - 0,45$ m / s, 3 - $V = 0,45 - 0,50$ m / s

Анализ графических зависимостей показывает, что они имеют одинаковую тенденцию увеличения. Эта тенденция ближе к прямо пропорциональной зависимости. Отклонение одинаковых характеристик, находящихся в пределах скоростей, не превышает 2,0 – 2,5 %.

Такие значения, параметры движения частицы и характеристики оптической установки являются оптимальными для данных условий движения частиц и параметров измерения установкой.

ВЫВОДЫ. Использование различных типов контрольно-измерительных приборов для определения и регулирования качественно-количественных показателей обработки сточных вод зависит от принятой технологии, типа сооружений и оборудования контроля. Разработанные способы контроля на основе лазерных оптических схем позволяют:

1. Повысить уровень автоматизации систем оборотного водоснабжения в части контроля качества очистки сточных вод, что повышает качество их очистки.

2. При обработке экспериментальных данных, в случае, когда изменение диаметров частиц находится в пределах $5 - 50 \cdot 10^{-6}$ м, максимальное среднеквадратическое отклонение экспериментальных и теоретических результатов равно $\sigma_{\text{MAX}} = 0,0071$ м, а минимальное среднеквадратическое отклонение - $\sigma_{\text{MIN}} = 0,00425$ м.

3. В зависимости от величины доплеровского сигнала и эффективного диаметра при условии, когда угол между лучами изменяется в пределах от 5° до 30° , при различных значениях скорости движения частицы составляет для первого случая $V = 0,35 - 0,40$ м / с, для второго -

$V = 0,40 - 0,45$ м / с и для третьего случая $V = 0,45 - 0,50$ м / с, графические зависимости имеют одинаковую тенденцию увеличения в виде прямо пропорциональной зависимости. Отклонение одинаковых характеристик не превышает 2,0 – 2,5 %, что свидетельствует о незначительном расхождении теоретических и экспериментальных зависимостей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мовчан С. И. Интенсификация работы оборотных систем водоснабжения / С. И. Мовчан. MOTROL. Commission of motorization and energetic in agriculture. – 2013, Vol. 15, No. 6, 157 – 164.

2. Реконструкция и интенсификация сооружений водоснабжения и водоотведения: Учебное пособие / А.А. Василенко, П.А. Грабовский, Г. М. Ларкина, А. В. Полищук, В. Й. Прогульный. – Киев – Одесса: КНУСА, ОГАСА, 2007. – 307 с.

3. Петросов В. А. Теоретическое обоснование и разработка методов интенсификации работы систем водообеспечения. Дис. ... д. т. н. ХГТУСА. – Х., 1993. – 139 с.

4. Ефремов А. Б. Усовершенствование технологии очистки сточных вод гальванических производств. Дис. ... к. т. н. / Научн. руковод. проф., д. т. н. Эпоян С. М., ХГТУСА. – Х., 2008. – 153 с.

5. Мовчан С. И. Інформаційна модель інтенсифікації роботи оборотних систем водопостачання / С. І. Мовчан, І. С. Шелігіна, О. В. Болтянський, Д. В. Спірінцев // Інформаційні технології в прикладній геометрії / Праці Таврійський державний агротехнологічний університет. Вип. 5, т. 6 - Мелітополь: ТДАТУ, 2013. – С. 76 – 81.

6. Смирнов Д. Н. Автоматическое регулирование процессов очистки природных и сточных вод / Д. Н.

- Смирнов. – 2 – е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1985. – 312 с.
7. Проскуряков В. А. Очистка сточных вод в химической промышленности / В. А. Проскуряков, Л. И. Шмидт. – Л.: Химия, 1977. – 464 с.
8. Лобачев П. В. Приборы для определения электрофоретической подвижности частиц в дисперсных системах / П. В. Лобачев, М. Н. Кривов // Водоснабжение и санитарная техника. – 1979. - № 9. - С. 4 – 6.
9. Сорокин А. Д. Прибор «Дзета – 2» для автоматического измерения дзета - потенциала коллоидных частиц / А. Д. Сорокин, А. С. Горюнов, А. А. Ткач // Водоснабжение и канализация. К.: 1977. – Вып. 35. – С. 28 – 32.
10. А. с. № 363907 СССР, МКИ С01 N27/26, В 01 К 5/00. Способ определения электрофоретической подвижности частиц суспензий / С. С. Духин, И. Т. Горбачук, В. П. Душенко. № 1673717, Заявл. 16. 06. 71, Оpubл. 25. 12. 73, Бюл. № 4.
11. А. с. № 379866 СССР, МКИ С 01 N 27/26, В 01 Д 5/00. Устройство для микроскопического электрофореза коллоидных систем и суспензий / С. С. Духин, И. Т. Горбачук, В. П. Душенко. - № 1670802, Заявл. 15. 06. 71, Оpubл. 20. 04. 73, Бюл. № 20.
12. А. с. № 442405 СССР, МКИ С 01 N 27/26, В 01 К 5/00. Устройство для микроскопического электрофореза суспензий / С. С. Духин, И. Т. Горбачук, В. П. Семёнов, И. Г. Алесина.- №1805107, Заявл. 30.06. 72, Оpubл. 05. 09. 74, Бюл.№ 33.
13. Мовчан С. И. Усовершенствование методов обработки и контроля качества сточных гальванических производств (применительно к предприятиям по ремонту сельскохозяйственной техники): дис ... канд. техн. наук / С.И. Мовчан. - Мелитополь, 2003. – 137 с.
14. Пат. № 34874А Україна, МПК⁷ G 01 N 15 / 00. Спосіб вимірювання ефективного діаметру та концентрації частинок у розчині / М. В. Морозов, С. І. Мовчан. – № 2008 03869, заявл. 27. 03. 2008, опубл. 26. 08. 2008, Бюл. № 16.
15. 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.
16. 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.
17. Патент на корисну модель № 86614 Україна, МПК⁷ G 01 N 15 / 00. Спосіб контролю якості очищення стічних вод / С. М. Епоян, М. В. Морозов, С. І. Мовчан. – № 2013 06821, заявл. 31. 05. 2013, опубл. 10. 01. 2014, Бюл. № 1.
18. Шифрин К. С. Теоретические и прикладные проблемы рассеивания света / К. С. Шифрин. Мн.: Наука и техника, 1971. – с.
19. Гороновский И. Т. Физико – химическое обоснование автоматизации технологических процессов обработки воды / И. Т. Гороновский. К.: Наукова думка, 1975. – 214 с.
20. Галингер И. С. Физическая и коллоидная химия / И. С. Галингер, П. И. Медведев. Учебн. пособ. для студентов сельхоз. вузов, Высш. шк., М., 1972. – 204 с.
21. Веселов Ю. С. Водоочистное оборудование / Ю. С. Веселов, И. С. Лавров, Н. И. Рукобратский. – Л., Машиностроение, Ленингр. отд – ние, 1985. – 232 с.
22. Гордин И. В. Оптимизация химико – технологических систем очистки промышленных сточных вод / И. В. Гордин, Н. Б. Манусова, Д. Н. Смирнов. – Л., Химия, 1977. – 176 с.

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ И АВАРИЙ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАССЕЙНОВ

Николай Котляр, Наталия Рощина, Виктория Лихоград

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

Аннотация. В работе приводится анализ деформаций конструкций и аварий монолитных железобетонных бассейнов. Рассмотрена технология возведения монолитного железобетонного дна чаши плавательного бассейна, основанная на использовании метода локального вакуумирования плиты в зоне ее опирания на несущие колонны.

Ключевые слова: плавательный бассейн, плита, бетонная смесь, вакуумирование бетона

ВВЕДЕНИЕ

Возведение сооружений обработки, аккумулирования и перекачки воды, резервуаров систем водоснабжения [6], плавательных бассейнов требует серьезного внимания на всех этапах создания строительной продукции – от проектирования до ввода в эксплуатацию.

Ярким примером ошибок проектирования и некачественной технологии выполнения работ может служить авария, произошедшая при испытании плавательного бассейна в Краснодаре. Утром 31 июля 2013 года во время испытаний чаши строящегося бассейна возле футбольного стадиона "Кубань" произошло обрушение монолитного железобетонного дна, в зонах опирания плиты на колонны (рис. 1). В результате утечки воды была разрушена также часть фасада здания спортивного объекта [1, 15].



Рис. 1- Результаты разрушения дна бассейна в Краснодаре [1, 15].

Fig. 1 - Results destruction bottom pool in Krasnodar

Разрушение плиты дна бассейна могло быть вызвано недостатками конструкции стыка в зоне «плита - колонна», слабой адгезией бетона с арматурой и, очевидно, дефектами бетонирования. Возможно, что такие разрушения несущей плиты бассейна можно было избежать, применив более

рациональную конструкцию стыка, обоснованную подвижность бетонной смеси и локальное вакуумирование дна бассейна в зоне продавливания.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

С точки зрения железобетонных конструкций, в местах опирания тонких перекрытий на колонны определяющим является расчет на продавливание. Это обусловлено действием равномерно распределенных сил на ограниченную площадь плиты.

Расчет плиты (без поперечной арматуры) на продавливание выполняется из условия:

$$F \leq \varphi_b R_{bt} u_m h_0, \quad (1)$$

где: F – продавливающая сила,

φ_b – экспериментальный коэффициент,

R_{bt} – расчетное сопротивление бетона растяжению,

u_m – среднее арифметическое между параметрами верхнего и нижнего оснований пирамиды продавливания [17].

Из формулы следует, что известные конструктивные решения, направленные на повышение прочности плиты на продавливание можно разделить на следующие типы: увеличение площади опирания плиты (рис. 2), увеличение толщины плиты (рис. 3), возведение без технологического перерыва колонны и зоны продавливания плиты [2] (рис. 4), установка поперечной арматуры в зоне продавливания (рис. 5).

Следует отметить, что правильно разработанные конструктивные решения не всегда позволяют выполнять качественно бетонные работы. Особенно это характерно для густоармированных участков дна бассейнов в области соединения плиты с колонной, где высока вероятность продавливания, в результате которого образуются наклонные трещины, распространяясь до верхнего ряда растянутой

рабочей арматуры, что приводит к аварийным ситуациям с обрушением конструкции. Поэтому для обеспечения несущей способности требуется дополнительное усиление продольной и поперечной арматурой рассматриваемого участка плиты [3] (Рис.6). В тоже время густота армирования узла затрудняет процесс качественного распределения и уплотнения укладываемой бетонной смеси, что усложняет обеспечение требуемых показателей плотности, прочности, трещиностойкости и водонепроницаемости.

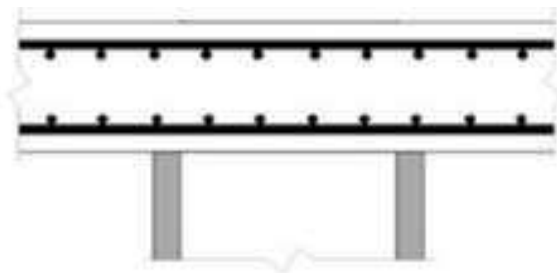


Рис. 2 - Увеличение площади опирания плиты
Fig. 2 – The increasing the area of bearing slab

Поэтому, с целью повышения технологичности узла следует применять такие методы обработки, которые будут способствовать качественному уплотнению бетонной смеси в области соединения колонны и плиты, а в следствии обеспечению требуемых прочностных характеристик.

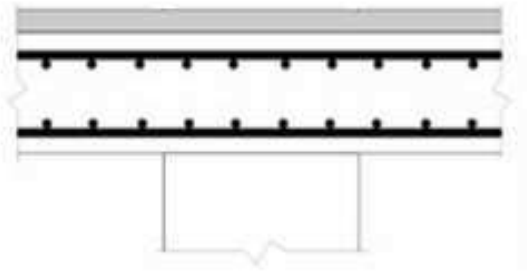


Рис. 3 - Увеличение толщины плиты
Fig. 3 – The increasing the thickness of the slab

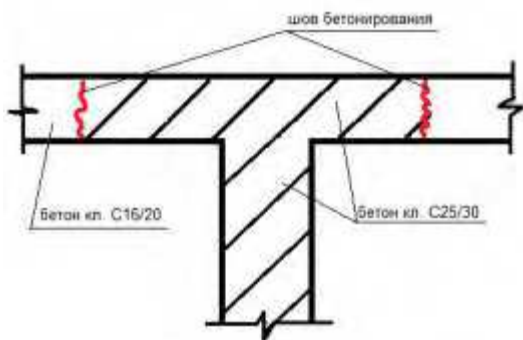


Рис. 4 - Бетонирование в один прием области стыка колонны и плиты
Fig. 4 - Concreting in one reception joint area columns and slab

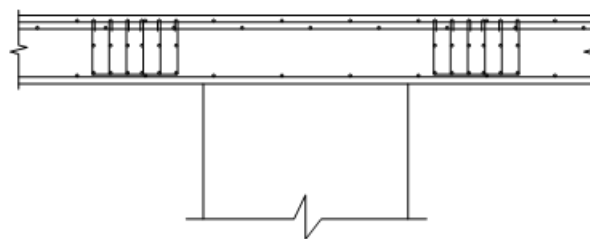


Рис. 5 - Установка поперечной арматуры в зоне продавливания
Fig. 5 - Setting of transverse reinforcement in the area of jacking



Рис. 6 – Высокий коэффициент армирования в определенных зонах конструкций
Fig. 6 - High reinforcement ratio in certain areas of structures

Существенному повышению эффективности возведения несущих монолитных конструкций способствует применение бетонных смесей с химическими добавками и рациональных технологий уплотнения. К числу таких относится метод вакуумирования. Особенностью технологии бетонирования с использованием вакуумирования является применение бетонных смесей, которые отличаются по составу от смесей, укладываемых с помощью вибрирования. Бетонная смесь предназначенная для вакуумирования характеризуется бесконтактным строением и повышением на 20-40% соотношения П/Щ. Минимальное конечное водосодержание таких составов объясняется извлечением воды в большем количестве в сравнении с составами бетонов для виброуплотнения. При оптимальном соотношении

П/Щ конечное содержание воды в вакуумбетоне является практически постоянным [18].

Коэффициент вакуумирования $k_{упл.}^6$, полученный Н.А. Сторожуком [18] показывает зависимость уменьшения объема бетонной смеси от количества извлеченной воды, и вычисляется по формуле:

$$k_{упл.}^6 = \frac{V_{н.б.с.} - V_{к.б.с.}}{V_{изв.}}, \quad (2)$$

где: $V_{н.б.с.}$, $V_{к.б.с.}$, - объемы бетонной смеси до и после вакуумирования

$V_{изв.}$ - количество воды, извлеченной при вакуумировании.

Значение коэффициента вакуумирования $k_{упл.}^6$ исходя из формулы (2) должно равняться 1.

Первые сведения о сочетании вакуумирования с химическими добавками относятся к 30-м годам. В работе [5] отмечается, что сотрудником лаборатории треста "Строитель" Н.С. Сумароковым были поставлены опыты по вакуумированию бетона в бетономешалке в связи с предложенным им способом зимнего бетонирования. По идее этого метода, добавки имели назначение понизить температуру замерзания воды в бетоне, а также ускорить процесс схватывания бетона при пониженных температурах. Результаты испытаний показали большое увеличение прочности и морозостойкости вакуумированного бетона с добавками по сравнению с контрольным образцом (превышение прочности, в среднем 158%).

В.С. Гордон установил, что совместное влияние добавки хлористого кальция и вакуумирования ускоряет процесс твердения бетона, особенно в раннем возрасте (в суточном возрасте - в 3 раза) и при пониженных температурах, и существенно увеличивает морозостойкость [6]. Кроме того, вакуумирование сглаживает некоторые отрицательные последствия применения добавки хлористого кальция (уменьшается усадка и электропроводность бетона).

Н.А. Сторожук [18], также показывает целесообразность использования хлористого кальция при вакуумировании бетона.

Ряд работ [10, 4, 19, 21] посвящен применению ПАВ при вакуумировании бетона. И.Н. Ушакова и Н.В. Михайлов рассматривают применение добавки ССБ, в процессе вакуумирования, сочетая добавку с виброперемешиванием и виброуплотнением [12]. Авторы отмечают, что улучшается структура цементного камня, увеличивается прочность и плотность песчаного бетона. Добавка 0,1% ССБ способствует образованию более мелкокристаллической и тонкокапиллярной структуры цементного камня, однако процессы структурообразования несколько замедляются. Этот

недостаток устраняется применением комплексной добавки 0,1% ССБ + 1%. Вакуумированные бетоны с добавками 0,5 и 1,0% ССБ имеют повышенную морозостойкость, пониженную истираемость (на 15% по сравнению с контрольными), возрастает сопротивление ударной вязкости (примерно на 25%). Водопоглощение бетона за 5 месяцев не превышало в среднем 3%. Микроскопические исследования структуры в шлифах, снятых с эталонных образцов и испытанных на морозостойкость, не показали разрушений бетона ни в контактах, ни в заполнителе [19].

Положительные результаты исследований позволяют сделать предположение о эффективности аналогичных современных добавок и в технологии локального вакуумирования.

Однако, данных по возведению рассматриваемых узлов соединения монолитной железобетонной плиты дна и колонны с технологическими режимами вакуумирования оптимальных составов бетонных смесей с современными химическими добавками в литературных источниках ранее не рассмотрены.

Поэтому, для установления зависимости набора прочности рассматриваемой бетонной смеси, при использовании методов формирования с вакуумированием, был проведен многофакторный эксперимент.

Цель эксперимента – изучение особенностей твердения вакуумируемых смесей различных составов, которые в дальнейшем могут использоваться для оптимального подбора параметров вакуумирования, обеспечивающих наибольшее значение прочности бетона несущих конструкций.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучив особенности технологии бетонирования зоны опирания перекрытия на колонну можно сказать, что правильно разработанные конструктивные решения не всегда позволяют выполнить качественно бетонные работы. Особенно это характерно в зонах с высоким коэффициентом армирования, например, зона продавливания перекрытия. Густота армирования затрудняет процесс качественного распределения и уплотнения бетонной смеси, что усложняет обеспечение требуемых прочностных характеристик конструкций [16].

Определить оптимальный состав бетонной смеси для вакуумирования, выявить влияния вакуумирования на бетонные конструкции, разработать организационно-технологические решения для выполнения бетонных работ с применением вакуумирования позволит повысить качество работ.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- подбор оптимального состава бетонной смеси,
- экспериментальное определение влияния вакуумирования на бетон с применением суперпластификатора и без него,
- обработка полученных результатов,
- определение параметров локального вакуумирования конструкции,
- совершенствование организационно-технологических решений для вакуумирования зон продавливания конструкций.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

1. Подбор оптимального состава бетона

В соответствии с поставленной задачей были проведены экспериментальные исследования вакуумирования для составов бетонных смесей применяемых на строительных объектах. Исследования проводились в лаборатории строительных материалов и изделий Харьковского национального университета строительства и архитектуры, которые заключались в вакуумировании бетонной смеси на специально собранной установке и использовании известных стандартных методов испытаний.

В качестве исследуемых составов бетонной смеси рассматривались бетоны, которые поставяет завод «Бетоникс» (г.Харьков), принявший участие в проведении исследования. Строительная лаборатория предоставила составляющие для бетона и добавку СП1-ВП. Подбор состава бетона в проведенных экспериментах выполнен для класса В30 по методике разработанной строительной лабораторией завода. Использовался шлакопортландцемент М500 (ВАТ Хайдельбергцемент Украина), кварцевый песок $M_{кр}=1,31$ (ОАО «Кременчугский речной порт»), щебень из природного гранитного камня фракцией 10-20 мм и добавка СП1-ВП. Дозирование всех компонентов проводилось по весу. Бетонная смесь для изготовления лабораторных образцов перемешивалась вручную и уплотнялась на лабораторной виброплощадке с амплитудой колебаний 0,5мм и частотой 2960 кол/минуты. Задавался режим формования с вакуумированием, продолжительность процессов устанавливалась по реле времени ВЛ-17 [11? 12].

СП1-ВП – добавка, относящаяся к пластифицирующему-водоредуцирующему виду - суперпластификаторам. Представляет собой смесь натриевых солей полиметиленафталинсульфокислот различной молекулярной массы с добавлением воздухоподавляющего компонента.

Суперпластификатор СП1-ВП рекомендуется применять в производстве сборного железобетона, в том числе преднапряженного, в производстве конструкций из монолитного тяжелого бетона классов по прочности на сжатие С12/15 и выше, в производстве конструкций из мелкозернистого бетона классов по прочности С8/10 и выше, а также для производства густоармированных конструкций, тонкостенных конструкций и конструкций со сложной конфигурацией. Максимальная эффективность суперпластификатора СП1-ВП достигается при изготовлении высокоподвижных смесей П4 и П5 и при получении высокопрочных бетонов С35/40 и выше. Суперпластификатор СП1-ВП рекомендуется применять для изготовления бетонных конструкций и изделий с уплотнённой структурой цементного камня и с улучшенным качеством поверхностей.

Применение суперпластификатора СП-1-ВП позволяет:

- увеличить подвижность бетонной смеси от П1 до П5 без снижения прочности и долговечности бетона (при неизменном содержании воды и цемента),
- увеличить прочностные характеристики бетона на 20% и более (за счет сокращения расхода воды при неизменных расходе цемента и подвижности бетонной смеси),
- получить бетонные смеси и бетоны, содержащие не более 1,7 % вовлеченного воздуха,
- изготавливать конструкции и изделия с уплотнённой структурой цементного камня и с улучшенным качеством поверхностей,
- снизить расход цемента в равноподвижных смесях на 15-20%,
- сократить продолжительность и энергетические затраты при тепло-влажностной обработке бетона,
- значительно сократить время и энергетические затраты на вибрирование бетонной смеси, а в ряде случаев и полностью отказаться от вибрирования.

2. Вакуумирование конструкции

При выполнении большинства бетонных работ приходится сталкиваться:

- с необходимостью получить высококачественный бетон, что требует использование бетонных смесей с низким водоцементным отношением,
- целесообразностью применения подвижных бетонных смесей, что позволяет использование бетонных смесей с высоким водоцементным отношением.

Выполненная вакуумная обработка смеси обеспечивает уменьшение содержания воды в бетоне на 15-30 %. При этом водоцементное отношение снижается на ту же величину. Это

способствует увеличению прочности бетона на сжатие (после 28 дней) в среднем на 100-150 кг/см² (20—40 %). Вероятность появления трещин на поверхности плиты днища бассейна существенно уменьшается, т. к. бетон после вакуумирования практически не дает усадки.

Длительность вакуумной обработки смеси зависит от размеров конструкции, и, в среднем составляет – 1 минута на 1 см толщины обрабатываемой поверхности.

3. Экспериментальные исследования повышения прочности плиты в зоне продавливания

Цель эксперимента - изучение особенностей твердения вакуумируемых смесей различных составов, которые в дальнейшем могут использоваться для оптимального подбора параметров вакуумирования, обеспечивающих наибольшее значение прочности бетона в рассмотренной несущих конструкциях.

Основной задачей исследований является установление характера зависимости набора прочности бетонной смеси с применением добавки СП1-ВП от времени при использовании вакуумирования.

Для этого в процессе нагружения бетонного образца измерялось критическое усилие.

3.1. Проведение многофакторного эксперимента

С целью получения результатов по заявленной теме были изготовлены кубики-образцы из бетона С25/30 с поперечным сечением сторон 70x70x70 мм.

Номера серий бетонных образцов за составом:

- 1 – невакуумированный бетон без применения химической добавки,
- 2 - невакуумированный бетон с применением химической добавки СП1-ВП,
- 3 - вакуумированный бетон без применения химической добавки,
- 4 - вакуумированный бетон с применением химической добавки СП1-ВП.

В рамках контроля прочности бетона в промежуточном возрасте испытания проводились на 4 образцах в возрасте 3, 7, 14 и 28 дней.

Порядок проведения испытаний:

1. Приготовление бетонной смеси (с водоцементным отношением В/Ц=0,66).
2. Укладка бетонной смеси в формы.
3. Вакуумирование образцов на протяжении 7 минут.
4. Последующее твердение бетона происходило в нормальных условиях (Т=18...20° С, W=60%).

Испытание происходило в соответствии с действующими стандартами [8,19].

В ходе проведения испытаний установлено, что разрушению подвергались больше и сильнее не вакуумированные образцы по сравнению с вакуумированными (рис. 7, табл. 1).



а) бетонный образец, который не вакуумировался



б) бетонный образец, который вакуумировался,

Рис. 7 – Испытание образцов с добавкой СП1-ВП на 7 день при усилии P = 158,9 кН

Fig. 7. Test of samples with the addition СП1-ВП on day 7 at a force F = 158.9 kN

а) Sample of concrete which is not subjected to a process with vacuumization,

б) Sample of concrete which is subjected to a process with vacuumization,

Табл. 1 – Результаты экспериментальных исследований набора прочности бетоном
Table 1 - Results of experimental studies strength compressive of concrete

№	Вид заполнителя				Добавка универсал СП1-ВП, %	Разрушающее усилие $R_{руй}$, кН			
	Цемент, кг	Песок, кг	Щебень, кг	Вода, л		3 суток	7 суток	14 суток	28 суток
1	305	570	1315	200	-	62,3	119,4	142,7	163,8
2	305	570	1315	200	0,5	86,1	148,9	205,3	238,0
3	305	570	1315	200	-	86,2	148,9	205,8	240,1
4	305	570	1315	200	0,5	172,2	264,8	299,1	336,5

Полученные результаты рассматриваем как случайную выборку генеральных совокупностей, согласно методике оценки точности и правильности при малом числе измерений [14].

Оценку точности измерений и правильности производят с помощью следующих критериев.

Выборочное среднее — среднее арифметическое.

Единичные отклонения — отклонения отдельных измерений от среднего арифметического:

$$\varepsilon_i = \bar{x} - \bar{x}_i \quad (3)$$

Алгебраическая сумма одиночных отклонений равна нулю:

$$\sum \varepsilon_i = 0 \quad (4)$$

Выборочная дисперсия для n найденных значений $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ случайной величины:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (5)$$

Положительные значения корня квадратичного из дисперсии называется средней квадратической ошибкой отдельного измерения или выборочным отклонением:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (6)$$

Коэффициент вариации:

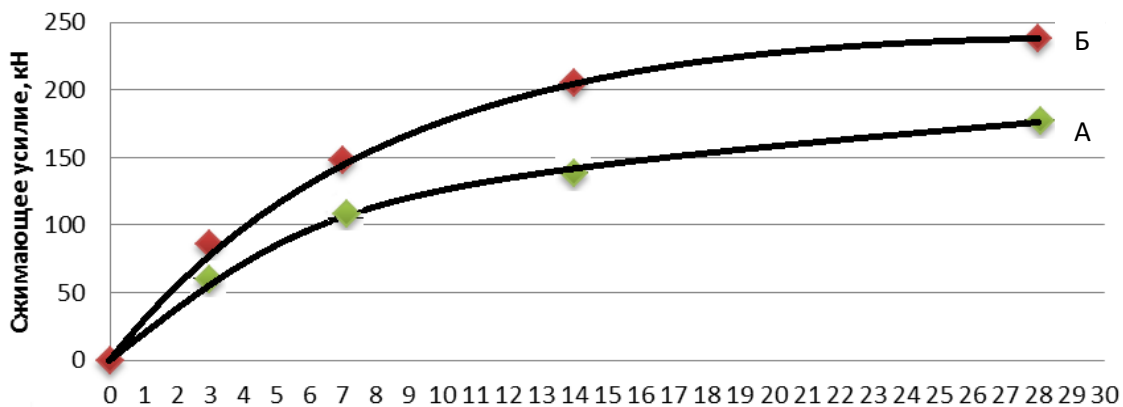


Рис. 8 - Динамика набора прочности бетона А - без применением добавки СП1-ВП и без вакуумирования; Б -) с применением добавки СП1-ВП и без вакуумирования

Fig. 8 – The dynamics of strength compressive of concrete a) without the use of additives СП1-ВП and without vacuumization, б) with the use of additives СП1-ВП and without vacuumization

$$\omega = \frac{\varepsilon}{x_{ср}} 100 \% \quad (7)$$

При оценке точности полученных результатов вычислим выборочную дисперсию среднего значения (среднего результата):

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)} \quad (8)$$

Средней квадратической ошибкой среднего арифметического или стандартным отклонением среднего результата:

$$S_{x^2} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (9)$$

Абсолютная ошибка при коэффициент $\alpha=0,95$:

$$\varepsilon_\alpha = t_\alpha \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (10)$$

где коэффициент Стьюдента с надежностью $\alpha=0,95$ показывает во сколько раз разность между истинным и средним результатами больше стандартного отклонения среднего результата. Число степеней свободы $f = n - 1 = 4 - 1 = 3$, тогда значения коэффициент Стьюдента составляет $t_\alpha = 3,18$.

Математическая обработка результатов приведена в табл. 2, 3, 4, 5.

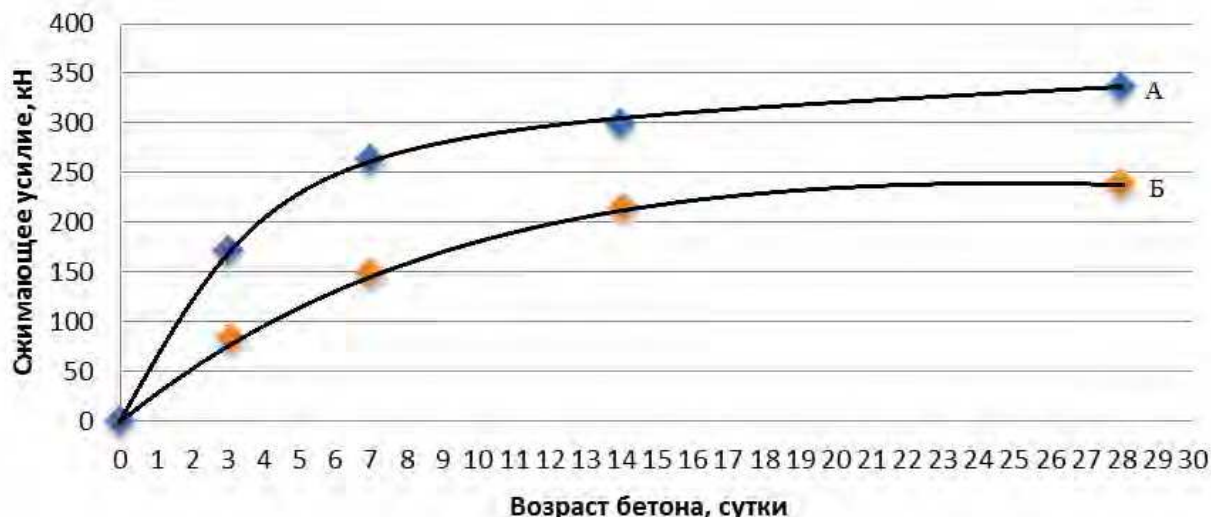


Рис. 9 - Динамика набора прочности вакуумированного бетона А - без применением добавки СП1-ВП с вакуумированием, Б - бетона с применением добавки СП1-ВП с вакуумированием

Fig. 9 – The dynamics of strength compressive of concrete А - without the use of additives СП1-ВП and with vacuumization, Б - with the use of additives СП1-ВП and with vacuumization

Прочность бетона, (МПа), рассчитывается с точностью до 1 МПа при испытаниях на сжатие для каждого образца за формулой:

$$f_{c,cube} = \frac{\alpha F}{A}, \quad (11)$$

где, F – разрушающее усилие, кгс,

A – площадь рабочего сечения образца, см²,

α – масштабный коэффициент для приведения прочности бетона в образцах базового размера, 0,85 для бетонных образцов размером 70 мм [8, 9].

Таким образом, вакуумирование бетонных смесей с химической добавкой СП1-ВП позволяет без дополнительного расхода цемента повысить качество и надежность несущих конструкций [11].

В связи с этим рассмотрим возможность применения полученных результатов для проектирования локального вакуумирования в области соединения железобетонной монолитной донной плиты днища чаши бассейна и колонны [11, 12, 13].

Для повышения эффективности бетонирования области соединения плиты днища чаши бассейна и колонны предложено использовать специальную конструкцию вакууммата, который сразу после окончания укладки бетонной смеси следует разместить на поверхность плиты в области соединения с колонной [12, 13].

Вакууммат имеет форму квадрата в плане, размеры которого вычисляется по формуле:

$$c = b + h_o \quad (12)$$

$$S_{BM} = (b + h_o)^2, \quad (13)$$

где: c - сторона вакууммата,

b - размер сечения колонны,

S_{BM} - площадь вакууммата,

h_o - рабочая высота плиты.

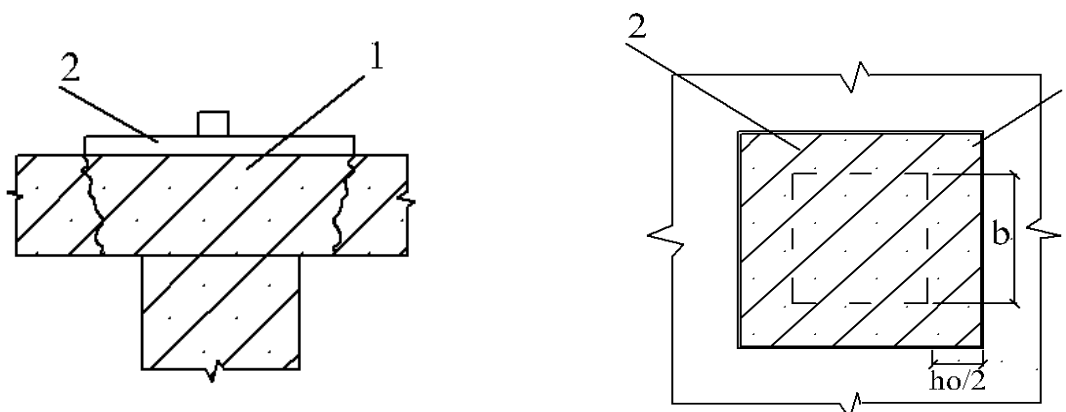


Рис.10 - Уплотнение бетонной смеси на густоармированных участках с помощью вакуумирования.

1 – зона продавливания, 2 – разработанная конструкция вакууммата,

Fig. 10 - Concrete mix compaction thickly at reinforced areas using the process with vacuum

ВЫВОДЫ

На основе проведенных исследований и обобщения эффективности вакуумной обработки установлено, что для днища бассейнов в области соединения плиты и колонны использование вакуумной обработки способствует повышению показателей прочности, трещиностойкости, а значит обеспечивает предотвращение появления деформаций, возможное обрушение конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авария бассейна в Краснодаре на стадионе Кубань [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://rerih.0pk.ru/viewtopic.php?id=130>
2. Болгов А., 2005. Расчет узлов сопряжения колонн с плоскими безбалочными перекрытиями / А. Болгов // НИИЖБ. Научные изыскания – №5/2005 "Строительная инженерия".
3. Болгов А. Усиление плит на продавливание поперечной арматурой / А. Болгов, А. Сокуров, Д. Кузеванов (НИИЖБ им. А. Гвоздева)
4. Гаджиды Р., 1981. Поверхностно-активные вещества в строительстве / Р. Гаджиды, А. Меркин. - Баку, Азербайджанское гос. изд-во. - 131 .
5. Гершберг О., 1940. Вакуум-бетон / О. Гершберг, А. Десов, А. Итин. - М.-Л.: Гос. изд-во строит. лит. -116 .
6. Гончаренко Д., Алейник А., 2013. Водопроводные сети г. Харькова и возможные пути повышения их эксплуатационной долговечности / MOTROL // Commission of motorization and energetics in agriculture/ - Lublin – Rzeszow. – Vol. 15 #6/ - 3-10
7. Гордон С., 1950. Вакуумирование бетона / С. Гордон. - М.: Машиностроение. - 172 .
8. ДСТУ Б.В.2.7-214:2009. Методи визначення міцності за контрольними зразками.
9. ДСТУ Б В.2.7-224:2009. Будівельні матеріали. Правила контролю міцності
10. Ильченко Н., 1977. Исследование ускорения твердения вакуумбетона: автореф. ... дис. канд. техн. наук / Н. Ильченко, - Днепропетровск. – 19 .
11. Котляр Н., 2009. Использование метода вакуумирования бетона в каркасно-монолитном строительстве / Н. Котляр, Н. Житинская // Науковий вісник будівництва.- Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ.- Вип.51. - 90-95.
12. Котляр Н., 2009. Повышение эффективности бетонных работ в каркасно-монолитном строительстве / Н. Котляр, Н. Житинская // Науковий вісник будівництва.- Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ.- Вип. 52. - 29-32.
13. Котляр Н., 2014. Технологические решения локального вакуумирования плит перекрытия каркасно-монолитных зданий / Н. Котляр, Н. Рощина, Н. Соколенко // Науковий вісник будівництва. –Вип. №1(75).-47-50.
14. Кремер Н., 2003. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник / Н. Кремер.— М.: ЮНИТИ-ДАНА. — 543 .
15. Плясунов Е., 2006. Бескапитальный стык колонны и перекрытия с комбинированным армированием в монолитном железобетоне безбалочном каркасе: автореф....дис. канд. техн. наук: 19.12.2006 / Е.Плясунов, Красноярский ГАСА. -К.- 20 .
16. Попов Н., 1985. Проектирование и расчет железобетонных конструкций / Н. Попов, А. Забегаев. Учеб. пособие для строит. спец. вузов. - М.: Высш. шк.- 319 .
17. Сторожук Н., 1990. Технология вибровакуумных бетонов изделий и конструкций: автореф....дис. канд. техн. наук: 08.10.90 / Н. Сторожук, ХИСИ-Х.-33 .
18. Ушакова И., 1966. Влияние заполнителей, добавок ПАВ-ССБ и вакуумирования на процессы структурообразования, структуру и свойства цементно-песчаного бетона: дис... канд. техн. наук./ И. Ушакова - М.-161.
19. Хаютин Ю., 1991. Монолитный бетон. Технология производства работ / Ю. Хаютин. - М.: Стройиздат. -576 .
20. Шпынова Л., 1981. Физико-химические основы формирования структуры цементного камня /Л. Шпынова, В.И. Чих, М.А. Саницкий, Х.С. Соболев, С.К. Мельник. Львов: Изд-во при ЛГУ изд. объедин. "Вища школа". – 158 .
21. Обрушение строящегося бассейна в Краснодаре вылилось в уголовное дело [Электронный ресурс] –Режим доступа: <http://www.regnum.ru/news/accidents/1718088.html>

PREVENTION OF DEFORMATIONS AND ACCIDENTS OF MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE POOLS

Summary. The article provides an analysis of deformations and accidents of monolithic reinforced concrete pools. Technology of construction reinforced concrete considered the bottoms of bowls, swimming pool, based on the use of local vacuumization slab method in the zone of its bearing on the supporting columns.

Key word: swimming pool, slab, concrete mix, concrete pumping

АНАЛИЗ РАБОТЫ СЕКЦИЙ НАПОРНОГО РУКАВНОГО ФИЛЬТРА ПРИ ПОВЫШЕННОМ ДАВЛЕНИИ

Валерий Осипенко

Вадим Осипенко

ООО НПП «Днепроэнергосталь»

Адрес: Украина, г.Запорожье, 69008, ул. Экспрессовская, д.6

E-mail: destal@ukr.net

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы работы напорных рукавных фильтрах в условиях повышенного давления газов на входе в аппарат, проанализированы причины влияющие на характер изменения гидравлического сопротивления фильтра, проведен выбор наиболее эффективных условий работы фильтра с точки зрения перепада давления и остаточной запыленности очищенных газов, внедрение которых на промышленных установках позволит сократить выброс взвешенных частиц в атмосферу и снизить энергетические затраты на работу напорных рукавных фильтров.

Ключевые слова: напорный рукавный фильтр, фильтрация, фильтровальный рукав, гидравлическое сопротивление, потеря напора, эффективность очистки, остаточная запыленность, регенерация, выгрузка пыли.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс фильтрации является наиболее эффективным процессом для выделения суспендированных (взвешенных) твердых частиц из газового потока. Как правило, этот процесс реализуется на любой пористой перегородке. Чаще всего в ее качестве используется фильтровальный материал. Фильтровальный материал может быть как тканый (лавсан), так и нетканый (фетр). Механизм улавливания пыли на пористой перегородке может быть различным в зависимости от сил, действующих на частицу пыли при ее прохождении – инерционный, броуновский, электростатический и другие [1].

Процесс фильтрации через пористую перегородку наиболее широко реализован в рукавных фильтрах. Как правило, данные аппараты представляют собой металлический корпус, разделенный на камеры чистого и грязного газа. Между ними установлены фильтровальные рукава, через которые и осуществляется фильтрация газового потока. По мере накопления пыли на поверхности рукава проходит процесс регенерации, который заключается в удалении слоя пыли и восстановлении фильтрующей способности рукавов [2].

Существует несколько разновидностей рукавных фильтров в зависимости от механизма их регенерации и в зависимости от расположения тягодутьевого агрегата. Если дымосос или вентилятор расположен после фильтра (по ходу газа), то фильтр работает под разрежением и называется вакуумным, если тягодутьевое оборудование перед аппаратом, то фильтр называется напорным. В последнее время наибольшее распространение получили вакуумные фильтры, работающие под разрежением [3]. Они имеют ряд значительных преимуществ, главные из которых – более высокая

эффективность очистки газов от пыли и возможность работы дымососов на чистом, уже обеспыленном газе.

Что касается напорных фильтров, то длительное время они не находили широкого применения в силу следующих недостатков:

- Низкая эффективность очистки, с остаточной запыленностью не менее 30-40 мг/м³.
- Плохая регенерация рукавов, осуществляемая по принципу «обратной продувки» вентилятором.
- Низкая стойкость фильтровальных рукавов, их частая замена.
- Высокая степень абразивного износа рабочего колеса тягодутьевого оборудования ввиду его работы на запыленном газе.

Обычно напорные фильтры имеют гидравлическое сопротивление до 2000 Па, и тяга в сети обеспечивается дымососом с напором до 3-5 кПа. С точки зрения перспективы использования напорных фильтров, основной проблемой был подбор фильтровального материала для обеспечения высокой эффективности очистки газов и повышения срока службы рукавов. В последнее время эта проблема нашла свое решение ввиду стремительного развития линейки производимых материалов для фильтрации. Кроме того, ряд компаний предложили использование традиционной схемы рукавных фильтров, работающих под разрежением для напорной схемы. Особенную актуальность эти разработки получили в свете развития технологии обеспыливания колошникового газа доменных печей.

В данном случае, побудителем тяги служит не дымосос, а технологический агрегат, который продуцирует запыленные газы под высоким давлением. Одним из таких технологических агрегатов является доменная печь, колошниковые газы из которой выходят с давлением 1,8-2,5 атм. В этом случае дымосос отсутствует, и все гидрав-

лическое сопротивление сети и газоочистной установки преодолевается за счет избыточного давления колошниковога газа.

Газоочистная установка для обеспыливания колошниковога газа доменной печи, установлена на ОАО «Косогорский металлургический завод» (РФ, г. Тула). В качестве газоочистного аппарата используется напорный рукавный фильтр, состоящий из 9-ти независимых секций с индивидуальным входом «грязного» и выходом «чистого» газа. Вся установка рассчитана на обеспыливание 180 000 м³/ч колошниковога газа.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Одним из важнейших видов вторичных энергоресурсов на металлургических предприятиях является колошниковый газ доменных печей. Его химическая энергия в статье расхода баланса доменной плавки составляет до 45%.[4] Таким образом, его очистка и дальнейшее использование в качестве топлива имеет огромное значение для общего снижения расхода энергоресурсов и удешевления готовой продукции.

Выход колошниковога газа зависит от множества технологических факторов - состава исходного сырья, температуры и давления воздушного дутья, применения природного газа, развития процесса восстановления железа и др. Важнейшим фактором количественного выхода колошниковога газа является удельный расход кокса. Данная зависимость представлена ниже на Рис.1.

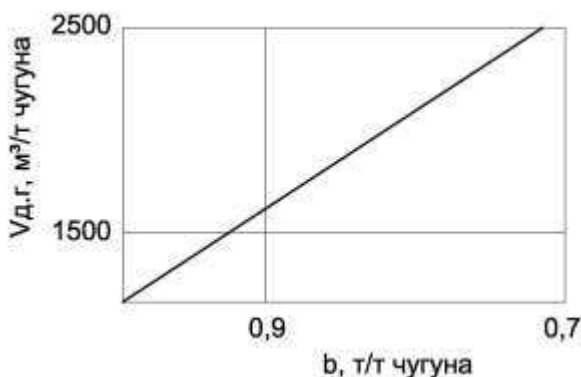


Рис.1 Зависимость удельного выхода доменного газа (Vд.г.) от удельного расхода кокса (b)

Fig. 1. Dependence of specific yield of blast-furnace gas (V blast-furnace gas) from specific consumption of coke (b)

Очевидно, что с увеличением расхода кокса на доменную плавку прямо пропорционально увеличивается и выход колошниковога газа. Для современных условий производства усредненная величина выхода колошниковога (доменного) газа составляет в пределах 1500 – 2000 м³/т чугуна. Это связано с постоянной работой технологов по снижению расхода кокса, который в настоящее время достигает 400-450 кг /т чугуна [5].

Температура колошниковога газа на выходе из доменной печи, так же зависит от ряда факторов, важнейшими из которых являются давление газа под колошником и ход ведения доменной плавки. При использовании «холодных» шихтовых материалов, например окатышей, кускового известняка и др. температура газа может находиться в пределах 120 – 200 °С в зависимости от поддержания уровня завалки в печи. Если же печь работает на «горячем» агломерате, то при ровном ходе доменного процесса температура колошниковога газа может достигать 250-300 °С. В случае технологического нарушения процесса доменной плавки, связанного, например с «канальным» ходом печи, температура колошниковога газа кратковременно может достигать 380-400 °С.[6,7]

Запыленность доменного газа варьируется в широких пределах и зависит от качества и состава шихты, а так же от давления газа под колошником. В среднем запыленность колошниковога газа на выходе из доменной печи составляет 15-20 г/м³. [8] При этом, требования к его остаточной запыленности выдвигаются достаточно жесткие и составляют не более 4 мг/м³. Этот показатель объясняется дальнейшим использованием доменного газа в качестве топлива и соответствующими требованиями к чистоте газа со стороны котлов и другой топливоиспользующей аппаратуры.[9] При этом следует отметить, что пыль шихтовых материалов, содержащаяся, в доменном газе является крупнодисперсной (см. Таблицу 1). Содержание фракций пыли с размером более 6 мкм составляет 56%. [10]

Таким образом, главной задачей системы очистки колошниковога газа от пыли является снижение содержания взвешенных веществ в газе до уровня не более 4 мг/м³ с максимальным сохранением его теплотехнических свойств, влияющих на эффективность использования доменного газа в качестве топлива.[11]

Типовая схема очистки доменного газа, до сих пор применяемая на большинстве отечественных металлургических комбинатах [12], показана на Рис. 2.

Таблица 1. Фракционный состав пыли из доменного газа

Table 1. Fraction composition of dust out of blast-furnace gas

№ п/п	Средний размер частиц пыли, мкм	Массовая доля, %
1.	более 60	5
2.	60-20	25
3.	20-6	26
4.	менее 6	44

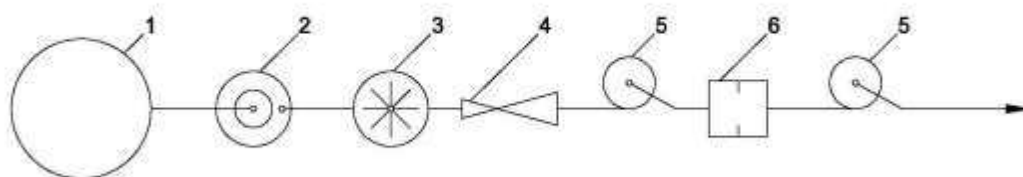


Рис. 2. Типовая схема очистки доменного газа

Fig. 2. Typical scheme of purification of blast-furnace gas

Колошниковые газы из доменной печи (1) поступают на первую ступень обеспыливания, в качестве которой наиболее часто используют сухой инерционный пылеосадитель или «пылевой мешок» (2). Его эффективность обычно не высока, однако для доменного газа составляет 30-40%, позволяя на выходе из данного аппарата получать запыленность на уровне 6-8 г/м³. Последнее время в качестве первой ступени очистки использует высокоэффективные циклоны специальной конструкции, которые позволяют достичь степени обеспыливания доменного газа на уровне 50-65%.

На второй ступени, доменный газ проходит полый форсуночный скруббер (3), в котором происходит орошение газа водой при помощи эвольвентных форсунок. Данный аппарат представляет собой полу цилиндрическую колону высотой более 20 м с расположенными по высоте ярусами орошения. Вход запыленного газа осуществляется в нижней части скруббера, выход – сверху. Эффективность его работы зависит от двух главных факторов – количества подаваемой на орошение воды и степени ее диспергирования. Так же имеет определенное влияние скорость газа в сечении скруббера, однако она является достаточно постоянной величиной ввиду постоянства расхода газа. Запыленность колошникового газа после полого скруббера достигает 1,5 – 2,0 г/м³.

После скруббера, доменный газ попадает в следующую ступень очистки, представленную скруббером (трубой) Вентури (4) и каплеуловителем (5). Данный аппарат относится к высокоэффективным и степень его очистки достигает 90-

95 % до уровня остаточной запыленности газа 40-60 мг/м³. Такие показатели достигаются за счет высокого гидравлического сопротивления трубы Вентури и высокой скорости движения газа, позволяющей получить высокодисперсное дробление капель жидкости.[13]

Доочистка доменного газа осуществляется в мокрой дроссельной группе (6). В принципе данный аппарат служит для поддержания постоянного давления под колошником доменной печи. Что достигается работой нескольких дросселей – плавной и грубой регулировки. Однако ввиду высокой скорости газа в просвете этих дросселей и с учетом подачи воды перед входом в группу, она служит своеобразным газоочистным аппаратом, позволяющим доочистить колошниковый газ до уровня 4-6 мг/м³ [14].

Следует отметить, что данная схема очистки имеет ряд существенных недостатков, главные из которых:

- Работа «мокрой» системы очистки приводит к образованию значительного количества шлама, требующего организации обратного цикла водоснабжения газоочистных установок, что является затратным мероприятием и ведет к вторичному загрязнению окружающей среды шламовыми водами.
- «Мокрая» система очистки не может обеспечить стабильно низкую запыленность очищенного газа и в разные периоды эксплуатации остаточная запыленность может колебаться от 5-6 до 45-70

мг/м³. Это пагубно отражается на топливоиспользующей аппаратуре и футеровке котлов или воздухонагревателей.

- После «мокрой» очистки теплотехнические характеристики доменного газа значительно ухудшаются – происходит снижение его физического теплосодержание и химической теплоты за счет получения практически 100% относительной влажности.

Имеется и ряд других недостатков, связанных с эксплуатацией «мокрого» оборотного цикла и трубопроводов очищенного газа.

В связи с этим, последнее время предпринимался ряд попыток внедрения сухих систем очистки доменного газа [15], лишенных указанных недостатков. В частности на некоторых японских комбинатах применяли системы обеспыливания с использованием напорных тканевых фильтров. Такие системы показали стабильно высокую эффективность очистки газов до уровня не выше 4 мг/м³. Однако применение классических напорных фильтров усложнилось отсутствием достаточно эффективной системы регенерации фильтровальных рукавов, которая бы надежно работала при давлении газов в корпусе фильтра на уровне 1,5-2,2 атм. Именно такое давление развивают газы под колошником доменной печи. Кроме того, напорные фильтры стандартной конструкции не позволяли применять современные фильтровальные нетканые материалы. Это объясняется бескаркасным типом рукавов в напорном фильтре. В этом случае рукав представляет собой мешок, зашитый с одной стороны в котором через равные промежутки вшиты антиколлапсные кольца. При этом фильтрация газа осуществляется изнутри рукава наружу. Для обеспечения качественной регенерации обратной продувкой, рукава должны быть изготовлены из облегченной ткани. Применение в них нетканых иглопробивных фетров высокой плотности было невозможно.

Для исключения указанных недостатков и получения надежной высокоэффективной системы сухой очистки доменного газа, специалистами НПП Днепроэнергосталь было решено опробовать в качестве пылеулавливающих аппаратов данных систем классические вакуумные рукавные фильтры с каркасным креплением рукавов [16,17].

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель работы – оценить параметры работы вакуумного рукавного фильтра с каркасным креплением рукавов в напорной схеме, исследовать эффективность классической системы им-

пульсной регенерации сжатым воздухом при работе фильтра под напором.

Одним из основных параметров работы рукавного фильтра является гидравлическое сопротивление, зависящее от нескольких параметров. Наиболее важные из них это скорость фильтрации и входная запыленность. При этом, общее гидравлическое сопротивление фильтра может быть представлено как сумма сопротивления чистой ткани и накапливаемого на ней слоя пыли. И если первая величина является практически постоянной и изменяется только в длительном промежутке времени – при накоплении внутри ткани автослоя пыли, который не удаляется даже при повторной регенерации – то сопротивление слоя пыли изменяется во времени с изменением толщины этого слоя.

Для определения потерь гидравлического напора на местном сопротивлении наиболее часто применяют формулу Вейсбаха [18]:

$$Нп = E(V^2/2g), \text{ где:}$$

Нп – потери напора на местном сопротивлении, Па,

E – коэффициент гидравлического сопротивления,

V – скорость газового потока, м/с,

g – ускорение свободного падения, м/с².

Задачей практических исследований в данном случае является определение коэффициента гидравлического сопротивления рукавного фильтра конструкции НПП Днепроэнергосталь. В качестве скорости, принимаем скорость фильтрации, рассчитываемую как отношение газового потока к площади фильтрации:

$$Vф = (Q/F)/3600, \text{ где:}$$

Vф – скорость фильтрации, м/с,

Q – газовый поток, м³/ч,

F – площадь фильтрации аппарата, м².

Обычно, в промышленных условиях, скорость фильтрации в рукавном фильтре находится в пределах 0,8-1,6 м/мин или 0,013-0,026 м/с.

Исследования проводились на сухой системе очистки доменного газа ДП-1 на ОАО «Косогорский металлургический завод». Общий вид данной газоочистной установки представлен на Рис. 3.

Сухая система очистки в данном варианте представлена девятью идентичными секциями, каждая из которых имеет площадь фильтрации 550 м². Схема секции приведена ниже на Рис. 4.

Работа секции осуществляется следующим образом. Грязный газ через соответствующий патрубок поступает в нижнюю часть секции. Внутри цилиндрической части корпуса секции установлен отбойный щит, назначение которого рассеять газовый поток и не допустить прямого контакта этого потока с фильтровальными рукавами.



Рис. 3. Общий вид сухой системы очистки доменного газа

Fig. 3. General view of dry system of purification of blast furnace gas

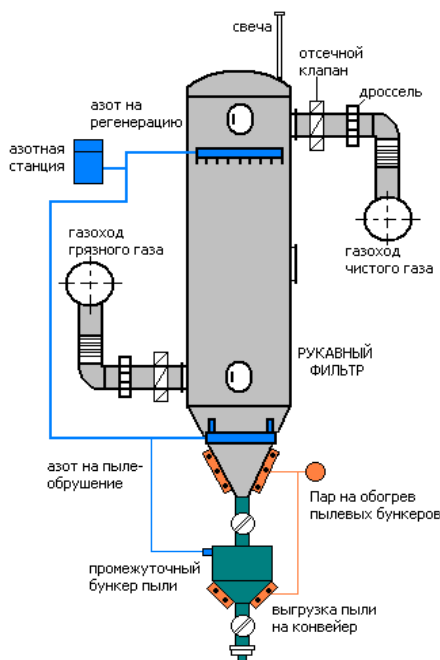


Рис.4. Схема секции рукавного фильтра

Fig. 4. Scheme of section of bag house filter

Далее газ фильтруется, оставляя слой пыли на наружной поверхности рукава. Очищенный поток собирается в верхней камере «чистого газа» и отводится из секции через патрубок в общий коллектор.

При накоплении слоя пыли, который приводит к росту гидравлического сопротивления секции до уровня в 1800 Па, шкаф управления фильтром дает команду на начало регенерации секции. При этом происходит закрытие дроссель-клапанов во входном и выходном патрубках. Привод этих дросселей – пневмоцилиндры, с рабочей средой в виде сжатого азота. После этого происходит поочередное срабатывание продувочных клапанов Ду 70 мм, которые перепускают импульс сжатого азота в раздаточный коллектор. Данный коллектор имеет специальное отверстие напротив горловины каждого фильтровального рукава. Импульс азота «выстреливает» внутрь рукава, регенерируя его и обрушивая слой уловленной пыли в бункер секции. Внутренний вид камеры «чистого газа» приведен ниже на Рис. 5. Таким образом проходит регенерация всех рукавов, после чего дроссели на входе и выходе открываются и процесс фильтрации доменного газа возобновляется.



Рис. 5 Внутренний вид камеры «чистого газа»

Fig. 5. Inside view of "clean gas" chamber

а так же хорошую температурную стойкость в интервале работы от 120 до 190 °С.

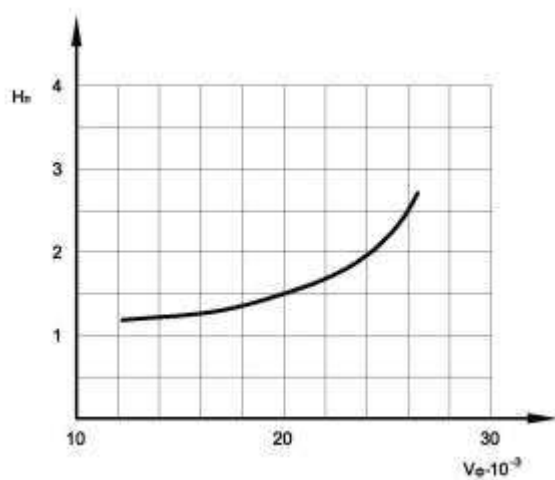


Рис. 6. Зависимость гидравлического сопротивления от скорости фильтрации

Figure 6. Dependence of hydraulic resistance from filtration velocity

В качестве материала для изготовления фильтровальных рукавов был выбран и использован нетканый иглопробивной фетр из волокна – полифенилсульфид. Он показал отличную химическую стойкость к гидролизу при кратковременном выпадении капельной влаги на рукавах в момент пуска и остановки газоочистной установки,

Учитывая, что все девять секций установки абсолютно одинаковые, эксперименты проводились на одной секции, №3. Скорость фильтрации, а следовательно и производительность секции регулировалась дроссель-клапаном. Замеры производительности проводились на «чистой» стороне фильтра, в выходном патрубке секции, в соответствии с действующей методикой. Одновременно производились замеры перепада давления на секции фильтра.

С целью предотвращения влияния слоя пыли на измерение перепада давления, через секцию пропускался условно чистый газ из заводского коллектора.

Полученные результаты приведены ниже на Рис. 6.

Математическая обработка полученной зависимости, исходя из ее подобия квадратичной кривой в соответствии с формулой Вейсбаха, дает уравнение следующего вида:

$$H_n = 47 \times 10^5 \times V_f^2$$

Таким образом произведение из формулы Вейсбаха $E/2g = 47 \times 10^5$, отсюда коэффициент

гидравлического сопротивления фильтра $E = 2,4 \times 10^5$.

Полученное значение коррелируется с литературными данными аналогичного коэффициента для напорных рукавных фильтров, который составляет $1,6-2,1 \times 10^5$. Это говорит о несколько повышенном гидравлическом сопротивлении вакуумных фильтров, работающих по напорной схеме по сравнению с классическими напорными фильтрами. [19,20]

В то же время, были проанализированы данные об изменении гидравлического сопротивления разных типов фильтров в более долгой перспективе, а именно в течении 6-ти месяцев. В качестве аналога классического напорного рукавного фильтра был взят напорный фильтр конструкции ГИПРОСТАЛЬ, установленный на Зестафонском металлургическом заводе за печами выплавки ферромарганца. Замеры производились один раз в месяц на протяжении полугода сразу после замены фильтровальных рукавов. Конструкция фильтра на протяжении всего времени исследований не изменялась.

Данные, полученные в ходе проведения замеров, приведены ниже в Таблице 2. Непосредственно гидравлическое сопротивление фильтра измерялось сразу после проведения регенерации. Это позволило получить данные о накоплении автослоя пыли в ткани на протяжении длительного времени эксплуатации. Из таблицы видно, что при длительном времени эксплуатации, классические напорные фильтры достаточно быстро набирают автослой и в дальнейшем при помощи обратной продувки регенерируются плохо, что не позволяет полностью восстановить фильтрующую способность ткани.

Таблица 2.

Table 2.

Месяцы	1	2	3	4	5	6
Нп, Па	1380	1650	1780	1820	1850	1860

Совершенно другая картина наблюдается при отслеживании гидравлического сопротивления классического вакуумного фильтра с импульсной регенерацией, работающего по напорной схем. В качестве образца, была выбрана та же секция №3 сухой системы очистки доменного газа, на которой в течении шести месяцев производились замеры перепада давления сразу после регенерации. Следует отметить, что в обоих случаях замеры производились при равной скорости фильтрации, которая регулировалась дроссель-

клапанами и при этом оборудование работало в стационарном режиме.

Результаты замеров гидравлического сопротивления секции рукавного фильтра на сухой системе очистки доменного газа, приведены в Таблице 3.

Таблица 3.

Table 3.

Месяцы	1	2	3	4	5	6
Нп, Па	1450	1550	1620	1630	1630	1650

Полученные данные говорят о более эффективной системе импульсной регенерации с использованием инжекторов [21], по сравнению с обратной продувкой классических напорных фильтров. Кроме того, нетканые фильтровальные материалы показали большую стабильность в наборе и сохранении гидравлического сопротивления в длительном промежутке времени. Кроме того, фильтры с неткаными материалами на всем периоде работы показывали стабильно низкий уровень остаточной запыленности в $4-6 \text{ мг/м}^3$. В то время как напорные фильтры в первый период времени обеспечивали остаточную запыленность на уровне $28-32 \text{ мг/м}^3$, а со временем при растяжении структуры ткани показали $42-50 \text{ мг/м}^3$.

ВЫВОДЫ

Отсутствуют какие-либо противопоказания с технической и эксплуатационной точек зрения для использования классических каркасных вакуумных рукавных фильтров при работе в напорной схеме. Обладая импульсной системой регенерации данные фильтры показывают высокую стабильность в очистке газов от пыли и в поддержании постоянного гидравлического сопротивления на протяжении длительного времени работы. Следует рекомендовать установку каркасных рукавных фильтров с импульсной регенерацией для работы под напором на любых технологических процессах. Положительный пример этого получен при эксплуатации системы сухой очистки доменного газа на ОАО «Косогорский металлургический завод».

ЛИТЕРАТУРА

1. Старк С., 1990. Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве М.: Металлургия. -400 .

2. Ужов В., Мягков Б., 1970. Очистка промышленных газов фильтрами. М.:Химия. – 320 .
3. Зарубежное и отечественное оборудование для очистки газов: Справочное издание/М. Ладыгичев, Г. Бернер. – М.:Теплотехник, 2004. – 696 .
4. Колобков П., Осипенко В., 1979. Использование вторичных энергоресурсов черной металлургии.- К.: Техника. – 168 .
5. Розенгарт Ю., Якобсон Б., Мурадова З., 1988. Вторичные энергетические ресурсы черной металлургии и их использование. – К.: Выща шк. Головное изд-во. – 328.
6. Вегман Е., Жеребин Б., Похвиснев А., и др., 2004. Металлургия чугуна. Под редакцией Ю. Юсфина. - М.: Академкнига. - 774 .: ил.
7. Ефименко Г., Гиммельфарб А., Левченко В., 1974. Металлургия чугуна. Киев, Вища школа.– 488 .
8. Андоньев С., Филиппев О. 1979. Пылегазовые выбросы предприятий черной металлургии. М.: Металлургия. - 192 .
9. Хесин Ю., 1976. Охрана труда в доменном производстве. М.:Металлургия.-263.
10. Толочко А., Филиппев О., Славин В., Гурьев В., 1986. Очистка технологических и неорганизованных выбросов от пыли в чёрной металлургии. - М.: Металлургия. – 208.
11. Справочник работника газового хозяйства. Изд. 3-е, перераб. и доп. Л.: Недра, 1973. – 360 .
12. Рыжко Э., 1979. Защита воздушного бассейна от выбросов предприятий черной металлургии: пер. с польск. М: Металлургия. - 240 .
13. Юдашкин М., 1984. Пылеулавливание и очистка газов в черной металлургии. М.: Металлургия. -320 .
14. Старицкий В., 1973. Газовое хозяйство заводов черной металлургии. М.: Металлургия. – 360 .
15. Очистка газов в металлургии. Специальный выпуск Института черной металлургии Англии, №83. Пер. с англ. М., «Металлургия», 1968. – 372.
16. Очистка колошникового газа доменных печей с применением рукавных фильтров / Осипенко В., Осипенко В. // Бюллетень «Черная металлургия». – 2009 - №4. – 72-75.
17. Эффективность использования пылегазоочистного оборудования в черной металлургии / Осипенко В., Безбабный С., Осипенко В. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2004 - №4. – С. 112-121.
18. Калицун В., Дроздов В., 1980. Основы гидравлики и аэродинамики: Учебник для техникумов. – М.: Стройиздат, 1980. – 247 .
19. Альтшуль А., 1970. Гидравлические сопротивления. М.: Недра. – 216 .
20. Рабинович Е., 1974. Гидравлика. М.: Недра. – 296 .
21. Редько А., Бабенко В., 2013. Усовершенствование расчета газового эжектора для системы газоснабжения. MO-TROL.-Commission of motorization and energetics in agriculture : Polish Academy of sciences. – Lublin. – Vol. 15, No.6. – 19-26.

ANALYSIS OF OPERATION OF SECTIONS OF PRESSURE BAG HOUSE FILTER AT INCREASED PRESSURE

Summary. In this article, issues concerning operation of pressure bag house filters within the conditions of increased pressure of gases at the inlet of the unit have been considered, reasons influencing on the character of change of hydraulic resistance of filter have been analyzed, choice has been carried out as to the most efficient conditions of filter operation as regards change in pressure and residual dust content of the purified gases, implementation of which at industrial units will reduce emissions of suspended particulate matters into the atmosphere and reduce energy costs for operation of pressure bag house filters.

Key words: pressure bag house filter, filtration, filter bag, hydraulic resistance, pressure loss, purification efficiency, residual dust content, regeneration, dust discharge.

СОДЕРЖАНИЕ

ОСОБЕННОСТИ ВОЗВЕДЕНИЯ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ НА ДЕЙСТВУЮЩИХ СЕТЯХ ВОДООТВЕДЕНИЯ Дмитрий Гончаренко, Дмитрий Олейник, Виталий Кайдалов	3
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АКТИВИРОВАНИЯ РАСТВОРОВ КОАГУЛЯНТА СУЛЬФАТА АЛЮМИНИЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ Степан Эпоян, Станислав Душкин, Тамара Айрапетян	11
ГИДРАТООБРАЗОВАНИЕ В ГАЗОВОМ ЭЖЕКТОРЕ Александр Редько, Елена Бабенко	19
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ РЕАГЕНТНОГО УДАЛЕНИЯ АММОНИЙНОГО АЗОТА ИЗ СТОЧНЫХ ВОД В ВИДЕ СТРУВИТА Виктор Ковальчук	27
LABYRINTH SCREW PUMP THEORY Pavlo Andrenko and Anton Lebedev	35
АНАЛИЗ НОРМ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ В УКРАИНЕ Виктор Маслак, Надежда Насонкина, Марина Гутарова, Константин Яковенко, Андрей Чумак	43
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕНОПОЛИСТИРОЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ ПРИ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИИ ВОДЫ Валерий Орлов, Сергей Мартынов, Екатерина Корнийчук	53
ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ПОВЕРХНОСТНО-ЛИВНЕВЫХ СТОЧНЫХ ВОД Степан Эпоян, Сергей Лукашенко, Наталия Гетманец	61
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНФРАКРАСНЫХ ВОДЯНЫХ ОТОПИТЕЛЬНЫХ ПАНЕЛЕЙ Артем Чередник, Андрей Редько	69
НАДЕЖНОСТЬ ОХЛАДИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ОБОРОТНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ Валерий Новохатний, Сергей Костенко	77
ОПТИМИЗАЦИЯ СЕТЕЙ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДА Александр Ткачук	85
ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА АЭРАЦИИ СТОЧНЫХ ВОД В ЗАКРЫТЫХ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ОКИСЛИТЕЛЬНЫХ КАНАЛАХ Степан Эпоян, Ирина Штонда, Юрий Штонда	93

ПЕНОГЕНЕРАТОР ВЫСОКОКРАТНЫХ ПЕН ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗОПРОВОДОВ ПОД ДАВЛЕНИЕМ Александр Редько, Игорь Капцов	101
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ГОРИЗОНТАЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ СВАЙ С ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ КОЭФФИЦИЕНТА ЖЕСТКОСТИ ОСНОВАНИЯ Илья Лучковский, Светлана Есакова	109
НАДЕЖНОСТЬ ВОДОПРОВОДНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБ УКРАИНЫ Александр Матяш	117
ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД С ПОМОЩЬЮ ПРОБИОТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ Надежда Насонкина, Вячеслав Маркин	125
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ОТСТОЙНИКА С ПОРИСТОЙ ПЕРЕГОРОДКОЙ Степан Эпоян, Дмитрий Сухоруков, Тамара Айрапетян	133
ОБРАБОТКА ПАРАМЕТРОВ ЧАСТИЦ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ПРИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ РАБОТЫ ОБОРОТНЫХ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ Сергей Мовчан	141
ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ И АВАРИЙ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАСЕЙНОВ Николай Котляр, Наталия Рощина, Виктория Лихограй	151
АНАЛИЗ РАБОТЫ СЕКЦИЙ НАПОРНОГО РУКАВНОГО ФИЛЬТРА ПРИ ПОВЫШЕННОМ ДАВЛЕНИИ Валерий Осипенко, Вадим Осипенко	159

List of the Reviewers

РЕЦЕНЗЕНТ

Тарадай Александр

Душкин Станислав

Эпоян Степан

Лурье Зиновий

Редько Александр

Избаш Михаил

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 of the Commission of Motorization and Energetics in Agriculture is 3,15 (June 2014).

GUIDELINES FOR AUTHORS (2014)

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.