

атационных затрат при применении мембранной ультрафильтрации. // *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення.*

VIII міжнар. наук-практ. конф., 10-14 вересня 2012 р. м. Алушта: матер. конф. - Харків: Райдер, 2012. – Т. 1. - С. 302 – 306.

УДК 628.315

Сизова Н.Д., Эпоян С.М.,

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

Мовчан С.И.

Таврический государственный агротехнологический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАССОПЕРЕНОСА В АППАРАТАХ ЭЛЕКТРОФЛОТООАГУЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Введение

Постоянно возрастающие объёмы сбрасываемых сточных вод промышленными производствами, высокие требования к качеству обрабатываемых стоков и обеспечение экологической безопасности водных объектов определяет дальнейшее направление в работе систем промышленного водоснабжения.

Актуальность направления исследований

Обработка сточных вод, как правило, осуществляется в вертикальных аппаратах, проходя несколько ступеней очистки от загрязнений ионами тяжёлых металлов, маслами и нефтепродуктами, взвешенными веществами и т.п. [1].

Поэтому актуальным является усовершенствование имеющихся аппаратов сброса сточных вод и исследование скоростей переноса энергии и вещества на поверхности раздела фаз в системах с движущимися средами (жидкими и газообразными).

Анализ исследования с использованием массопереноса

Вопросам теоретического исследования процессов массопереноса в аппаратах, имеющих сложную геометрическую форму, уделяется большое внимание. Для описания процесса массопереноса используется уравнение конвективно-диффузного переноса примеси [2].

Рассмотрено построение новых многомерных моделей транспортирования загрязнителя в вертикальных отстойниках.

Расчёт гидродинамики течения реализуется в горизонтальных отстойниках, имеющих сложную геометрическую форму с использованием теоретического исследования процессов массопереноса [3].

Целью данной работы является исследование и усовершенствование процессов обработки сточных вод промышленных предприятий.

В связи с поставленной целью необходимо решить следующие взаимосвязанные задачи:

- разработать конструктивные решения и математическую модель процесса массопереноса в аппаратах электрофлотокоагуляционной обработки стоков, направленных на повышение эффективности их работы.

Конструктивно-технологические решения поставленной задачи

В системах оборотного водоснабжения установки электрофлотокоагуляционной обработки сточных вод являются сложным и многоступенчатым оборудованием. От правильного выбора используемой технологии и аппаратов зависит не только техническая надёжность работы систем повторного использования воды, но и эколого-экономические показатели всего процесса.

В рассматриваемых технических решениях [4, 5] при электрогенерировании газа и коагулянта во флотокамере, независимо от изменений расхода жидкости, об-

разуются три зоны: переходной и флота- ционный участки и участок формирования флотошлама.

Рассматриваемые конструктивные решения ограничивают использование водоочистного оборудования при обработке стоков с повышенным содержанием взвешенных и поверхностно – активных веществ, образующих значительные объёмы флотошлама.

Как правило, в таком и аналогичном оборудовании вызывают определенные технические трудности процессы электро- генерирования газа и коагулянта во флото- камере.

Для повышения надёжности работы водоочистного оборудования усовершенствована конструкция аппарата [6], в кото- рой предусматривается механическое отведение накапливающегося объёма всплывшего загрязнения.

Разработанная конструкция конус- ного уплотнителя флотошлама повышает интенсивность работы, как отдельных со- ставляющих водоочистного оборудова- ния, так и систем оборотного водоснабже- ния в целом за механическим отведением флотошлама в верхней части вертикаль- ного аппарата [7].

Известно [2], что распространения загрязнений, их количество и общая масса в водных растворах происходят в неоднородной структуре водного раствора (ионы тяжелых металлов, взвешенные вещества, масла, нефтепродукты и т.п.). Кроме того, «поведение» загрязняющих веществ зави- сит от многих других факторов.

Гидродинамические условия про- цессов обработки сточных вод включают несколько основных факторов: конвекти- вный перенос, процесс диффузии и фи- зико-химические процессы обработки стоков (флотокоагуляции) [8].

РЕЗУЛЬТАТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Массообменные или диффузионные процессы характеризуются перенесением одного или нескольких компонентов вход- ного потока (сточных вод) с одного фазо- вого состояния в другое через поверхность распределения фаз. При этом наиболее медленной и ограничивающей стадией

массообменных процессов есть молеку- лярная диффузия разделения [9].

Рассмотрим процессы очистки сточ- ных вод в камере реакции (рис.1), в кото- рой условия реализации процессов обра- ботки соответствуют промежуточному типу при идеальном смешивании и вытес- нении.

Схема флотокамеры камеры реакции (рис. 1) позволяет более полно проследить процессы, происходящие в пространстве над электродами (поз. 2) и камере реакции (поз. 5) [7].

Камера реакции, входящая в ниж- нюю часть флотокамеры, создаёт условия для сосредоточенного впуска газонасы- щенной жидкости, что дает возможность рассматривать диффузионную модель, наиболее часто встречающуюся в прак- тике очистки стоков.

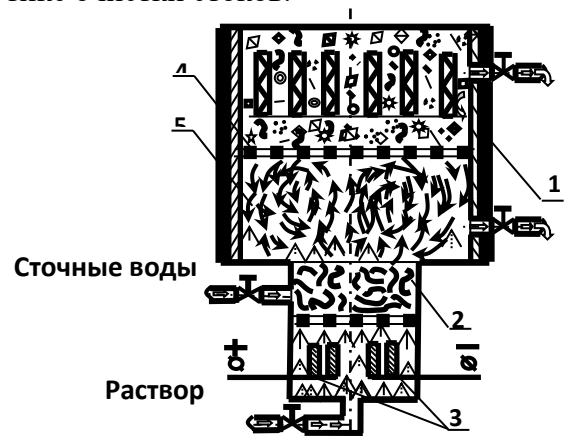


Рис. 1. Флотокамера камеры реакции: 1 – корпус аппарата; 2 - пространство над электродами; 3 – электроды; 4 – горизонтальная перфорированная перегородка; 5 - камера реакции.

При разработке математической мо- дели примем следующие допущения и упрощающие предположения:

- структура потока наиболее полно соответствует диффузной модели при на- личии не менее двух компонентов смеси;
- стоки движутся восходящими и ни- сходящими потоками в условиях напор- ной флотации;
- плотность водного потока остаётся величиной постоянной в условиях измене- ния эффективного диаметра частиц при- месей водных растворов.

Как правило, использование уравнения диффузии справедливо для стационарного движения жидких сред, на поверхности которых происходит массообмен одного (или нескольких) компонента с жидкостью. В случае, когда в переносимом веществе содержатся компоненты, химически отличные от жидкости во внешнем течении, то в потоке возникают градиенты концентрации [10]. В результирующей смеси может находиться любое количество химических компонентов и каждое из них в соответствии с законом Фика стремится диффундировать в направлении, противоположном собственному градиенту концентрации:

$$, (1)$$

где ρ - плотность жидкости (водного потока), кг/м^3 ; D_{12} - бинарный коэффициент диффузии каждой пары (двухкомпонентной, многокомпонентной) смеси, $\text{м}^2/\text{сек}$; ∇t_1 - градиент температуры, определяемый градиентом концентрации; m_1, m_2 - концентрация j -го компонента смеси, кг ; k_T - термодиффузионное отношение; T - температурный режим, определяемый условиями процесса.

При химических реакциях в любой точке исследуемого течения могут образовываться и распадаться отдельные смеси, что приводит к появлению градиентов концентрации. Таким образом, при химических реакциях диффузия может происходить даже при отсутствии массопереноса на поверхности тела [10].

Формирование зоны смешения связано с процессами диффузии (дисперсионной формой) водного раствора, в котором происходит формирование флотошлама.

Размеры переходной зоны, составляющие общую высоту активной части вертикальной флотокамеры H_D , сформированной за время t после начала поступления загрязнений в водный поток, определяются по формуле:

$$H_D = \alpha \cdot \sqrt{\frac{D \cdot t}{n}}, \quad (2)$$

где D – коэффициент диффузии; n – активная плотность (пористость) водного раствора; α – числовой коэффициент, зависящий от концентрации загрязнителя.

Были проведены лабораторные исследования обработки сточных вод ремонтно-механического завода [11] с повышенным содержанием взвешенных веществ, масел и нефтепродуктов. Установлено, что эффект диффузии наиболее сильно проявляется в небольших объемах водных растворов, когда высота шаров жидкости не превышает 1,0-2,0 м. Влияние диффузии (диффузионных процессов) усиливается для жидкостей (водных растворов, технических жидкостей и т.п.) с уменьшением плотности и увеличением коэффициента диффузии и становится менее заметным с увеличением объемов жидких растворов и увеличением скорости водного потока.

Были изучены процессы диффузии от вертикальной и горизонтальной составляющих скорости движения частиц водных потоков. Вследствие того, что вертикальная составляющая больше горизонтальной, вертикальная дисперсия больше горизонтальной дисперсии (рис. 2).

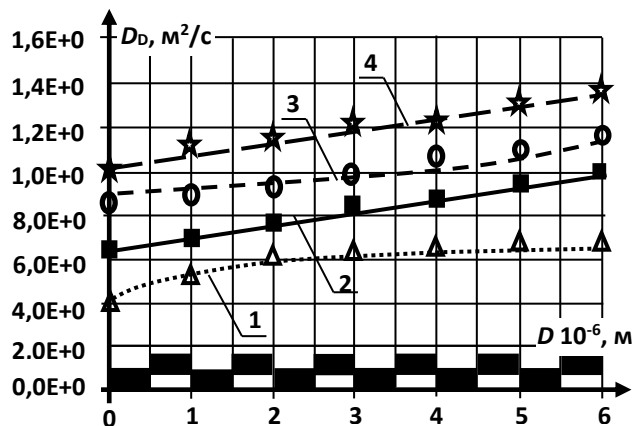


Рис. 2. Зависимость коэффициента диффузии D_D , ($\text{м}^2/\text{с}$) от линейного размера $D \cdot 10^{-6}$, м (эффективного диаметра) частиц примесей водных растворов.

На рис. 2 приведены зависимости коэффициента диффузии от величины эффективного диаметра, который изменялся в следующих диапазонах: 1 – $D=4...10$ мкм; 2 - $D=10...20$ мкм; 3 - $D=20...30$ мкм; 4 - $D=30...40$ мкм.

Необходимо отметить, что при этом происходило изменение параметров измерительной оптической схемы. Угол между лучами установки изменяется от 5 до 30° ,

скорость движения частицы были следующими: 1 – $V=0,35-0,40$ м/с; 2 – $V=0,40-0,45$ м/с; 3 – $V=0,45-0,50$ м/с.

В самом общем случае, дисперсия представляет совокупное действие механической дисперсии (конвективной диффузии), являющейся следствием неодинаковых (по величине) значений скоростей и молекулярной диффузии, возникающей вследствие переноса вещества за счёт градиента концентрации и определяемой законом Фика [10]:

$$\vec{G}_{\text{Диф.}j} = -\rho D_j \cdot \nabla m_j, \quad (3)$$

где $\vec{G}_{\text{Диф.}j}$ – плотность диффузного потока массы j -ого компонента смеси, кг/(м²с); m_j – концентрация j -ого компонента смеси, кг j -ого компонента смеси/кг смеси; ρ – плотность смеси, кг/м³; D_j – коэффициент диффузии, м²/с.

С учётом производительности водоочистного оборудования:

$$Q = -D_M \cdot W \cdot \frac{dc}{dx}, \quad (4)$$

где Q – диффузионный поток через поперечное сечение W в направлении x ; D_M – коэффициент молекулярной диффузии, зависящий от плотности жидкой среды; c – концентрация водного раствора.

Массоперенос в жидких и газообразных средах обусловлен градиентами концентрации двух или нескольких компонентов. Рассматриваются те системы, для которых справедлив закон Фика, т.е. скорость диффузии любого компонента пропорциональна градиенту концентрации этого компонента и не зависит от градиентов температуры, давления и концентрации других компонентов смеси. Однако надо учесть, что условия Фика строго выполняются лишь для бинарных смесей при отсутствии всех градиентов, кроме градиентов концентрации [10].

Дисперсия загрязняющих веществ в сточных водах (водных растворов, технических жидкостях и т.п.) определяется коэффициентом D по формуле:

$$D_D = D_{\text{Д}} + D_L = \delta V + D_M, \quad (5)$$

где $D_{\text{Д}}=\delta V$ – коэффициент конвективной диффузии; δ – параметр плотности (плотностной структуры) водного раствора; V – скорость диффузии водного потока; D_L – коэффициент молекулярной диффузии.

Роль конвекции и диффузии в переносе загрязняющих веществ может быть определена с учётом безразмерного критерия Пекле:

$$Pe = V \cdot L_D / D_L, \quad (6)$$

где L_D – высота контрольного объёма водного потока, имеющего форму вертикального цилиндра.

Конвективный перенос загрязняющих веществ происходит при больших значениях критерия ($Pe>0,1$), а диффузионный – при ($Pe<0,1$).

Показано, что с учётом формы водоочистного оборудования, жидкость (сточные воды) движется восходящими и нисходящими потоками.

Рассмотрим процесс обработки стоков во внутреннем объёме коагулятора, представляющим собой вертикально расположенный цилиндр (рис. 3).

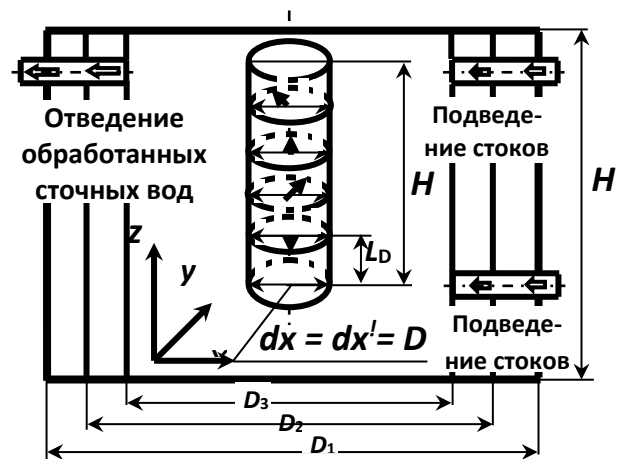


Рис. 3. Контрольный объём внутри вертикального электрофлотокоагулятора: D_1 , D_2 , D_3 – диаметры коаксиального аппарата; H – общая высота аппарата; H_1 – контрольный объём потока сточных вод, в виде вертикального цилиндра.

Выделим в восходящем потоке контрольный объём в виде параллелепипеда, со сторонами: dx , dy , dz .

С учётом средней скорости u потока жидкости (сточных вод) и плотности ρ на

внутреннюю поверхность каждой коаксиальной камеры будет:

$$u + du = u + \frac{\partial u}{\partial x^1} dx^1, \quad (7)$$

$$\rho + d\rho = \rho + \frac{\partial \rho}{\partial x^1} dx^1, \quad (8)$$

где dx^1 - внутренний диаметр одной или нескольких коаксиально расположенных емкостей.

$$W_{n-1}^1 = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot H, \quad (9)$$

где W_{n-1}^1 - объём каждого отдельно взятого вертикального цилиндра водного потока, m^3 ; $n-1$ - количество рассматриваемых объёмов водного потока, шт.; H - высота вертикально расположенной коаксиальной ёмкости, м.

При движении восходящего потока через время dt во внутрь выделенного контрольного объёма цилиндра войдёт масса жидкости, определяемая выражением:

$$W_{n-1}^1 dt, \quad (10)$$

где dt - время «работы» вертикально расположенного цилиндрического объёма.

В случае, когда водоочистное оборудование (аппарат) состоит из нескольких емкостей, объём каждой из них определяется в зависимости от геометрических параметров каждой вертикально расположенной ёмкости.

Из выделенного объёма вертикально расположенного цилиндра за тот же промежуток времени dt выйдет масса жидкости.

$$\left(u\rho + \frac{\partial \rho}{\partial x^1} dx^1 \right) V_{n-1}^1. \quad (11)$$

Изменение концентрации загрязняющих веществ, параметров и характеристик частиц водных растворов (сточных вод) можно представить в виде трёхмерного уравнения турбулентной диффузии, учитывающего физико-химическое взаимодействие загрязняющих веществ со сточными водами, наличие источника загрязнений и отдельными параметрами (характеристиками) частиц примесей водных растворов:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + \\ & + (w + w_{C_B} + w_{C_r}) \cdot \frac{\partial C}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_C \frac{\partial C}{\partial z} \right) + K_{CL} \nabla^2 C + \\ & + Q \Delta(x - x^*) \Delta(y - y^*) \Delta(z - z^*) - \frac{C}{\tau_0}, \end{aligned} \quad (12)$$

где C - концентрация загрязняющих веществ; u, v, w - составляющие скорости циркуляции воды по декартовым осям x, y, z соответственно; w_{C_B}, w_{C_r} - соответственно гравитационная вертикальная и горизонтальная скорости загрязняющих веществ; τ_0 - постоянная химического разложения загрязняющих веществ; $K_C, K_{CL} \nabla^2$ - вертикальный и горизонтальный коэффициенты турбулентной диффузии, m^2/c ; Δ - дельта-функция, учитывающая отдельную характеристику (параметр) частицы водного потока (в данном случае рассматривается эффективный диаметр частиц примесей водных растворов); Q - производительность (мощность) очистного оборудования, m^3/c ; x^*, y^*, z^* - координаты положения источника загрязнения в трёхмерном пространстве, м.

В самом общем виде, с учётом граничных условий, основное уравнение (12) движения частиц водного раствора имеет следующий вид [12, 13]:

$$\begin{aligned} & a \cdot \left[K_C \cdot \frac{\partial C}{\partial n} - (\beta_i + w_{C_B} + w_{C_r}) \cdot C + Q_i \right] + \\ & + d \cdot \left[K_C \cdot K_{CL} \cdot \frac{\partial C}{\partial n} + (C_V + C_\xi + C_D + C_n) \cdot C + Q_i \right] + \\ & + b \cdot (C - C_i) = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

где a, d и b - известные коэффициенты, принимающие значения либо 0, либо 1; β_i - параметры взаимодействия загрязнений с водой (зависят от скорости циркуляции, производительности водоочистного оборудования и объёма сточных вод); Q_i - известное количество загрязняющих веществ, поступающих в единицу времени, mg/m^3 ; $K_C \left(\frac{\partial C}{\partial n} \right)$ - нормальная составляющая турбулентного потока загрязняющих веществ через боковой (жидкий)

контур; $K_C K_{CL} \left(\frac{\partial C}{\partial n} \right)$ – нормальная составляющая движения исследуемых частиц в водном потоке; C_V, C_ξ, C_D, C_n – концентрации сточных вод в которой учитывается соответственно электрофоретическая скорость, электрокинетический дзета-потенциал, эффективный диаметр и количество частиц примесей, находящихся в соответствующем диапазоне измерений.

С учётом динамических условий процесса, пассивности «поведения» загрязнений и соответствующих определяемых частиц примесей водных растворов (C_V, C_ξ, C_D, C_n) основное уравнение (13) принимает следующий вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + w \frac{\partial C}{\partial z} = K_C \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + K_{CL} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + K_{Cx} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (14)$$

Данное уравнение (14) учитывает вертикальную составляющую диффузии при движении восходящим потоком. Его решение при граничных условиях получается с учётом вертикальной и горизонтальной составляющих турбулентной диффузии.

С учётом физико-химических процессов, происходящих в системах промышленного водоснабжения, уравнение материального баланса при очистке сточных вод принимает следующий вид:

$$n_{ei} \cdot \frac{\partial C_i}{\partial t} + V \cdot \frac{\partial C_i}{\partial z} + \frac{\partial S_i}{\partial t} = 0, \quad (15)$$

где n_{ei} – эффективность извлечения i -ого загрязнения (ионов) тяжёлых металлов; V – скорость обработки сточных вод; S_i – объёмная концентрация (ионов) тяжёлых металлов, извлечённых из состава стоков; C_i – эффективность обработки сточных вод от ионов тяжёлых металлов i -ого загрязнения.

Условия потенциального движения приводят к значительным упрощениям [14, 15] вследствие изменения concentra-

ции водных растворов (стоков), параметры и характеристики частиц примесей водных растворов остаются неизменными и их определение возможно в любом месте водного потока.

Выводы и предложения

1. Усовершенствованное и разработанное водоочистное оборудование позволяет производить обработку сточных вод с повышенным содержанием СПАВ, взвешенных веществ, масел и нефтепродуктов с использованием вертикальных аппаратов электрофлоккоагуляционной обработки стоков.

2. Предложена методика исследования процесса обработки сточных вод на основе теории массопереноса, которая проводилась в два этапа в статических и динамических условиях.

3. Обосновано применение уравнения диффузии в камерах электрофлоккоагуляции водоочистного оборудования.

4. Выполнен эксперимент по определению концентрации загрязнений и обработке сточных вод, что позволило:

- определить основные геометрические размеры водоочистного оборудования (камер реакции и флотации, узла газонасыщения и т.п.);
- оптимизировать количество ступеней обработки соответствующего вида стоков;

– определить режимы работы водоочистного оборудования и эффективность обработки сточных вод.

5. Аппараты аналогичной конструкции могут быть использованы при эксплуатации и реконструкции очистных сооружений, при различных режимах очистки и составом сточных вод.

ЛИТЕРАТУРА.

1. Інтенсифікація технологічних процесів комплексного очищення стічних вод промислово-урбаністичних центрів: монографія [Н.А. Мішкова-Клименко, С.М. Епоян, М.Д. Гомеля та інші.] – Харків: ІКХХВ. Ім. А.В. Думанського, НАН України, ТОВ «ТО Ексклюзив», 2013. – 240 с.
2. Беляев Н.Н. Математическое моделиро-

- вание массопереноса в отстойниках систем водоотведения [Текст] / Н.Н. Беляев, Е.К. Нагорная. – Д.: Нова Ідеологія, 2012. – 112 с.
3. Беляев Н.Н. Математическое моделирование массопереноса в горизонтальных отстойниках [Текст] / Н.Н. Беляев, В.А. Козачина. – Д.: Акцент ПП, 2014. – 114с.
 4. Патент на корисну модель № 109872. Україна, МПК⁷ (2006.01) С 02 F1/46. Апарат для оброблення стічних вод / С.І. Мовчан. – Заявка № у 2016 02900; заявл. 22. 03.2016, опубл. 12.09.2016, Бюл. № 17.
 5. Патент на корисну модель № 111868 Україна, МПК⁷ (2006.01) С02 F1/46. Трисекційний електрокоагулятор / С.М. Епоян, С.І. Мовчан. – Заявка № у 2016 04936; заявл. 04.05.2016. Опубл. 25.11.2016, Бюл. № 22.
 6. Патент на корисну модель № 111903 Україна, МПК⁷ (2006.01) С02 F1/46. Ущільнювач флотошлему / С.І. Мовчан. – Заявка № у 2016 05339; заявл. 17.05.2016. Опубл. 25.11.2016, Бюл. № 22.]
 7. Епоян С.М. Механізм формування флотошлему у вертикальній флотокамері / С.М. Епоян, С.І. Мовчан // Проблеми водопостачання та гідраліки: Науково-технічний збірник. Головний редактор А.М. Кравчук. – К.: КНУБА, 2016 – Випуск 27. С. 129- 137.
 8. Теплотехнический справочник / Под общ. Ред. В.Н. Юренева и П.Д. Лебедева. В 2-х т. Т.2. Изд. 2-е перераб. М.: Энергия, 1976. – 896 с.
 9. Артамонов В.В. Процеси і апарати водоочистки: Навч. посібник/ В.В. Артамонов, Т.В. Віжевська. - Рівне: Рівненський державний технічний університет, 1999. – 127 С.
 10. Кейс В.М. Конвективный тепло- и массообмен. Пер. с англ. / В.М. Кейс.- М.; Энергия, 1972. – 448 С.
 11. Разработка и исследование установок по очистке стоков цеха ремонта сельскохозяйственной техники (Симферопольский РМЗ): отчет по НИР / Мелитоп. Инт механіз. Сел. Хоз-ва; Руководитель Н.И. Бунин. – 20 X – 89; № 01880067562; Инв. № 02880025684. – Мелитополь, 1989. – 28 с.
 12. Кулінченко В.Р. Термодинаміка. Аналіз дійсних термодинамічних циклів: Монографія/ В.Р. Кулінченко, О.П. Ломейко. – Мелітополь: Видавничий будинок ММД, 2012. – 280 с.
 13. Немцев З.Ф. Теплоэнергетические установки и теплоснабжение: Учебн. Пособие для втузов / З.Ф. Немцев, Г.В. Арсеньев. – М.: Энергоиздат, 1982. – 400 с.
 14. Ключников А.Д. Энергетика теплотехнологии и вопросы энергосбережения / А.Д. Ключников. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 128 с.
 15. Кулинченко В.Р. Справочник по теплообменным расчётам / В.Р. Кулинченко. - К.: Техника, – 165 с.

УДК 696.13

Латорец Е.В.*Харьковский национальный университет строительства и архитектуры*

РЕКОНСТРУКЦИЯ СЕТЕЙ ВОДООТВЕДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАКТЕРИЦИДНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ

Введение. Эксплуатация железобетонных и бетонных трубопроводов водоотведения без противокоррозионной защиты на протяжении даже короткого срока службы привела к необходимости их перекаладывания и ремонта. В настоящее время до 80% железобетонных трубопроводов Украины находятся в аварийном и предаварийном состоянии [1].

В настоящее время рынок Украины наводнен различными гидроизоляционными материалами, характеризующимися высокой эффективностью в защите строительных конструкций от водной среды. Однако специфика коррозионных процессов в сетях водоотведения, преобладающая роль в них микробиологических