

- дною и воздушного бассейнов. Утилизация отходов. Сб. науч. трудов XIII междунар. науч.-техн. конф. 13-17 июня 2005г. – Х.: УкрВОДГЕО, 2005. – С.609-615.
5. Василенко С.Л. Оценочные показатели энергоэффективности систем централизованного водоснабжения / С.Л.Василенко // Интегровані технології та енергозбереження, 2005, № 3. – С.89-94.
 6. Кожинов Н.В., Добровольский Р.Г. Устранение потерь воды при эксплуатации систем водоснабжения. – М: Стройиздат, 1988. – 348с.
 7. ВБН 46/33-2.5-5-96. Сільськогосподарське водопостачання. Зовнішні мережі і споруди. Норми проектування. – К.: Держводгосп України. – 152 с.
 8. Хоружий П.Д., Хомуцька Т.П., Хоружий В.П. Ресурсозберігаючі технології водопостачання. – К.: Аграрна наука, 2008. – 534с.
 9. Хоружий П.Д. Расчет гидравлического взаимодействия водопроводных сооружений. – Львов: Вища школа, изд-во при Львов. ун-те, 1983, - 152с.
 10. Хомуцька Т.П. Оптимізація роботи водопровідних систем з водозабірними свердловинами // Науковий вісник будівництва: зб. наук. праць. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2013. – Вип. 71. – С.361-366.
 11. Хомуцька Т.П., Сизоненко Г.А. Енергоощадне водопостачання: проблеми і рішення (на прикладі Чернігівського водопроводу) // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: наук-техн. зб.– К.: КНУБА, 2014. – Вип.23. – С.53-59.
 12. Хомуцька Т.П., Сизоненко Г.А. Дослідження доцільності застосування багатозонних тарифів на електроенергію у водопостачанні // Меліорація і водне господарство.– К: ІВПіМ НААН, 2014. – Вип.101.
 13. Хомуцькая Т.П. Энергосберегающие технологии в системах подачи и распределения воды / Сб. научных трудов «Современные энерго- и ресурсосберегающие, экологически устойчивые технологии и системы сельскохозяйственного производства», Рязань, 2013, № 10. – С. 246-252.
 14. Шкінь О.М., Хоружий П.Д., Хомуцька Т.П. Шляхи енергозбереження в системах господарсько-питного водопостачання на прикладі Чернігівського водопроводу // Водне господарство України. К., 2013. – № 2 (104),– С.18-22.

УДК 519.6:504.3.054

Беляев Н. Н. *, Русакова Т. И. **, Якубовська З. Н. ***

**Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна, Днепр, Украина*

***Днепропетровский национальный университет им. Олесья Гончара, Днепр, Украина*

****Украинский государственный химико-технологический университет, Днепр, Украина*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА ПРИ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ СТОЧНЫХ ВОД

Постановка проблемы и анализ публикаций. Производственные сточные воды от технологических процессов многих отраслей промышленности содержат щелочи и кислоты, а также соли тяжелых металлов. На предприятиях черной металлургии, на машиностроительных и металлообрабатывающих заводах широко используется химическая обработка метал-

лов кислотами в процессе травления. В результате образуются кислые железосодержащие стоки, имеющие свободные кислоты, (преимущественно серную, иногда смесь кислот) и соли железа (в основном $FeSO_4$). Соли железа в результате гидролиза и окисления образуют осадки ржаво-рыжего цвета. При большом загрязнении в водоемах полностью исчезает органическая жизнь, вода становится непригодной

для водоснабжения. Наличие в стоках кислот и щелочей вызывает преждевременную коррозию конструкций канализационных сооружений. Для предупреждения нарушения физико-химических и биохимических процессов в биоокислителях и водоемах, а также для осаждения из сточных вод солей тяжелых металлов кислые и щелочные стоки подвергают нейтрализации.

Нейтрализация кислот может проводиться любыми щелочами или солями: едким натрием, едким калием, известью, известняком, доломитом, мрамором, мелом, магнезитом, содой, отходами щелочей. Нейтрализацию проводят при взаимном смешивании кислых и щелочных сточных вод, либо обработкой сточных вод реагентом в смесительных реакторах-нейтрализаторах. Выбор метода нейтрализации зависит от объема и концентрации сточных вод, от режима их поступления, наличия и стоимости реагентов.

Анализ литературных источников показал, что проблемой очистки сточных вод широко занимаются как в Украине, так зарубежом. В работах излагаются теоретические и практические основы проектирования систем водоотведения сточных вод города, а также методики расчета производственно-бытовой и дождевой водоотводящих сетей [7]. Описываются современные методы и технологические схемы очистки сточных вод [2], приводятся научные обоснования создания замкнутых систем водопользования [3, 4], рассматриваются технологические схемы и методы механической, биологической, физико-химической очистки, доочистки сточных вод [5], эффективные способы безреагентной очистки в установках малой производительности [9, 10]. Зарубежными авторами также предлагаются физико-химические методы очистки сточных вод [11–13]. В большинстве работ, касающихся процессов нейтрализации кислых вод широко используются эмпирические зависимости, с помощью которых можно определить рекомендуемую дозу реагента, время нейтрализации, но данные зависимости не учитывают гидродинамические процессы взаимодействия сточных вод с реагентом,

форму емкости для нейтрализации, место подачи реагента. Таким образом, очевидна необходимость создания эффективных методов расчета для осуществления процесса нейтрализации сточных вод в специальных установках, позволяющих оценить эффект процесса нейтрализации с учетом практически всех факторов влияющих на этот процесс.

Цель и задачи. Целью работы является создание численной модели процесса нейтрализации кислых сточных вод в емкостях для нейтрализации.

Изложение основного материала. Станция нейтрализации сточных вод включает систему подачи рабочего раствора в нейтрализуемые стоки, которая содержит различные дозаторы, насосы и трубопроводы. Нейтральной по кислотно-щелочной реакции считается вода, показатель рН которой не выходит за пределы 6,5...8,5. Колебание показателя у сточных вод в любую сторону является причиной их направления перед сбросом в водоем или городскую канализацию, на нейтрализацию. В предложениях компаний имеется два типа станций, предлагаемых заказчикам для нейтрализации стоков объемом от 2000 л до 20000 л : проточный и контактный. Проточные типы установок (рис. 1) эффективны при значительных расходах стоков, контактные (рис. 2) – при их меньших количествах.

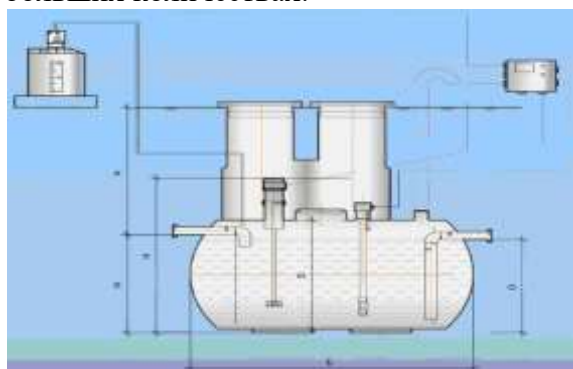


Рис. 1. Установка нейтрализации сточных вод подземного исполнения проточного типа [14]

В основном нейтрализация сточных вод осуществляется двумя методами: смешиванием щелочных и кислых стоков, с добавлением реагента.

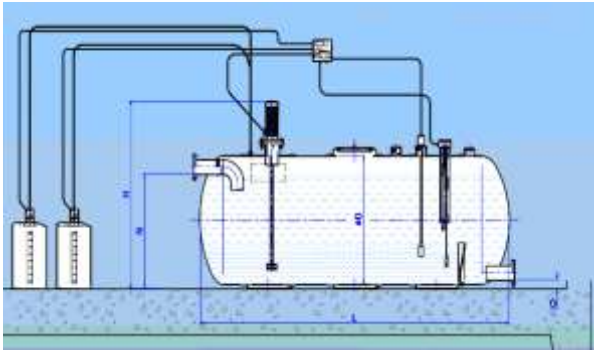


Рис. 2. Станция нейтрализации сточных вод наземного исполнения периодического типа [14]

Используя первый метод надо учитывать, что режимы сброса промышленных стоков, содержащих отработавшую щелочь и кислоту, как правило, на заводах различны. Кислые воды имеют обычно постоянную концентрацию и сбрасываются в систему канализации равномерно во времени. Щелочные поступают на нейтрализацию периодически, залпово. В связи с этим, станция нейтрализации сточных вод комплектуется регулирующим резервуаром, объем которого должен быть достаточен для принятия суточного количества щелочных вод. В дальнейшем стоки со щелочью выпускаются равномерно в камеру, в которой смешиваются с кислыми водами и взаимно нейтрализуются. Комплектация оборудованием станции, работающей по описанному способу, производится на основе баланса щелочных и кислых стоков, поступающих от всех агрегатов, цехов. При этом учитываются периоды выпуска сточных вод.

Второй метод нейтрализации стоков используется, когда в них отсутствует баланс щелочи и кислоты, обеспечивающий их самостоятельное связывание за счет химического взаимодействия. В этом случае, для полной нейтрализации в воду добавляются соответствующие реагенты. Реагентом обычно служат отходы от деятельности местных производств. К примеру, это может быть шлак, образующийся при химводоочистке на ТЭЦ, другие щелочесодержащие материалы. Нейтрализация

промышленных стоков, в которых содержится серная кислота (например, при травлении изделий из металла), может проводиться за счет использования отходов металлургической промышленности. Это шлаки доменного, феррохромового, сталеплавильного производства.

В Днепропетровске был введен в эксплуатацию первый в Украине высокотехнологичный завод по безотходной переработке использованных аккумуляторных батарей ООО «Рекуперация свинца» Международной научно-промышленной корпорации «Веста» (рис.3).



Рис. 3. Завод по переработке аккумуляторов в Днепропетровске

По принципу закрытого цикла на заводе перерабатываются все составляющие аккумуляторов, в том числе и электролит, которого ежегодно в окружающую среду на территории Украины попадает более 20 тысяч тонн. Электролит представляет собой раствор серной кислоты, которая считается, пожалуй, одним из ключевых химических соединений в мире. Это обусловлено широким спектром ее применения.

Серная кислота является важнейшим продуктом химической промышленности как по объему производства, так и по разнообразию областей применения. Крупными потребителями серной кислоты являются химическая и нефтехимическая промышленность, металлургия, машиностроение, сельское хозяйство и другие отрасли. Ежегодно в стране образуется 2 млн. т отработанной серной кислоты, что составляет 10 % от общего ее

производства. Такие объемы свидетельствуют о необходимости утилизации отработанной кислоты с целью экономного ресурсопользования и защиты окружающей среды. Отходы, образующиеся при использовании серной кислоты, включают кроме отработанной серной кислоты травильные растворы, кислые гудроны и сточные воды, содержащие кислоту менее 10 % (по массе). Насчитывается более 200 видов отработанной серной кислоты, содержащих около ста видов примесей, в том числе аккумуляторная кислота из отработанных свинцовых аккумуляторов.

Плотность электролита зависит от степени заряженности аккумулятора: 100% – 1,265 г/см³, 10% – 1,134 г/см³. Таким образом, можно предположить, что при безотходной переработке использованных аккумуляторных батарей требуется нейтрализация серной кислоты с процентным содержанием менее 10%. Плотность водного раствора гидроксида натрия (каустической соды), который можно использовать в качестве нейтрализатора, изменяется в зависимости от процентного содержания в таком диапазоне: 50% – 1,525 г/см³, 10% – 1,109 г/см³. Так при нейтрализации серной кислоты гидроксидом натрия (щелочью) происходит следующая реакция:



Моделирующие уравнения. Моделирование процесса нейтрализации осуществляется в два этапа (рис. 4): на первом этапе рассчитывается поле скорости водного потока внутри установки – гидродинамическая модель процесса; на втором этапе решается задача массопереноса – рассматривается движение сточных вод, содержащих кислоту и раствор щелочи.

На первом этапе моделирующим уравнением является уравнение для потенциала скорости [Л].

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (2)$$

где P – потенциал скорости.

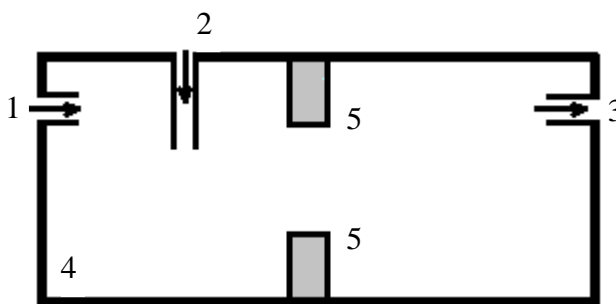


Рис. 4. Схема расчетной области (нейтрализация проточного типа):

1 – кислые сточные воды, 2 – щелочные сточные воды, 3 – нейтрализованная сточная вода, 4 – емкость, 5 – локальные сужения

При применении данного уравнения полагается, что ось Y направлена вертикально вверх. Для решения уравнения (1) ставятся следующие граничные условия [1]:

- на стенках емкости для нейтрализации, а также на других твердых поверхностях расположенных внутри нее ставится граничное условие вида: $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$,

где n – единичный вектор внешней нормали к твердой стенке;

- на границе входа водного потока из патрубка подачи кислоты $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$, где V_n – известное значение скорости водного потока;

- на границе, где водный поток выходит из ёмкости (рис. 4) $P = P_0 + const$, где P_0 – некоторое число (условие Дирихле).

Процесс распространения сточных вод и реагента внутри специализированной установки моделируется на основе уравнения массопереноса, которое записывается как для примеси (кислоты), так и для реагента (щелочи) [6, 8].

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) +$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \sum Q_i \delta(x - x_i)(y - y_i) \quad (3)$$

где C – концентрация кислоты (щелочи); u, v – компоненты вектора скорости потока; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коэффициент турбулентной диффузии; Q – интенсивность подачи

кислоты (щелочи); $\delta(x-x_i)\delta(y-y_i)$ – дельта-функция Дирака; x_i, y_i – координаты источника подачи кислоты (щелочи); t – время.

Численная модель. Численное интегрирование моделирующих уравнений проводится с использованием прямоугольной разностной сетки. Для численного интегрирования уравнения Лапласа (2) используется метода Либмана [1]. В этом случае аппроксимирующее уравнение имеет вид:

$$\frac{P_{i+1,j} - 2P_{i,j} + P_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1} - 2P_{i,j} + P_{i,j-1}}{\Delta y^2} = 0 \quad (4)$$

Неизвестное значение потенциала определяется по следующей зависимости:

$$P_{i,j} = \frac{\frac{P_{i+1,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1} - P_{i,j-1}}{\Delta y^2}}{\frac{2}{\Delta x^2} + \frac{2}{\Delta y^2}} \quad (5)$$

Для начала расчета по методу Либмана необходимо задать «начальное» значение потенциала скорости в расчетной области, например $P_{i,j} = 0$. Расчет прекращается при выполнении условия:

$$|P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n| \leq \varepsilon,$$

где ε – малое число (например, $\varepsilon=0.001$); n – номер итерации.

После расчета поля потенциала скорости выполняется расчет компонент вектора скорости на гранях разностных ячеек по зависимостям:

$$u_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, \quad v_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y} \quad (6)$$

Численное интегрирование уравнения массопереноса проводится с помощью неявной разностной схемы расщепления [8].

Алгоритм решения задачи. Решение задачи по нейтрализации кислотных сточных вод внутри специализированной емкости осуществляется в несколько этапов:

- на первом этапе решается гидродинамическая задача и определяется поле скорости водного потока внутри емкости;

- на втором этапе осуществляется решение уравнения массопереноса для сточных вод, содержащих кислоту; определяется концентрационное поле кислоты внутри емкости на момент времени t_n ;

- на третьем этапе осуществляется решение уравнения массопереноса для реагента; определяется концентрационное поле реагента внутри емкости на момент времени t_n ;

- на четвертом этапе в каждой разностной ячейке происходит перерасчет концентрации кислоты и реагента вследствие их химического взаимодействия, определяемого стехиометрическим соотношением. Полагается что химическая реакция протекает на временном промежутке Δt .

После выполнения 4-ого этапа получаем новое значение концентрационных полей для кислоты и реагента. Расчет повторяется, начиная со второго этапа.

Практическая реализация модели.

На основе разработанной численной модели был создан пакет прикладных программ, который построен на модульном принципе, т. е. состоит из набора подпрограмм, такая архитектура пакета позволяет решать широкий класс задач, не внося изменений в программы. Изменения вносятся только в файл исходных данных.

На последующих рисунках иллюстрируется работа разработанной CFD модели. Процесс нейтрализации происходит в два этапа. На первом этапе идет заполнение емкости сточной водой, содержащей кислоту на промежутке времени от 0 до t_1 . В момент времени t_1 начинается второй этап – подача щелочи. На рис. 5–6 показана концентрация кислоты H_2SO_4 на первом этапе, до $t=6,2$ (время в безразмерном виде), расчетный шаг по времени $\Delta t=0,2$. Значение концентрации кислоты представлено в процентах от максимального значения на входе поступления в емкость.

На рис. 7 – 8 показано изменение концентрации кислоты в сточных водах после начала поступления щелочи. Как видно из представленных рисунков подача щелочи резко изменяет содержание кислоты в сточных водах внутри установки.

Наиболее быстро процесс нейтрализации происходит в районе расположения патрубка подачи реагента, процесс нейтрализации сдвигается в виде фронта от участка входа сточных вод к выходному отверстию. К моменту времени $t=8,2$ процесс нейтрализации практически завершается.

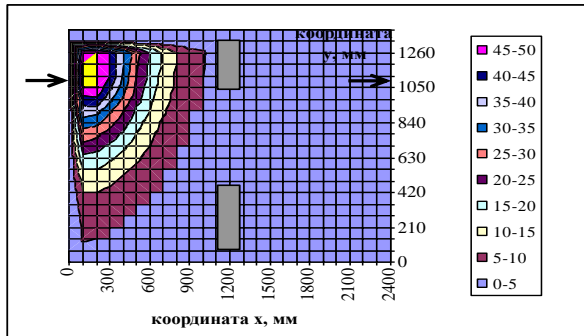


Рис. 5. Заполнение емкости сточной водой $t=1$

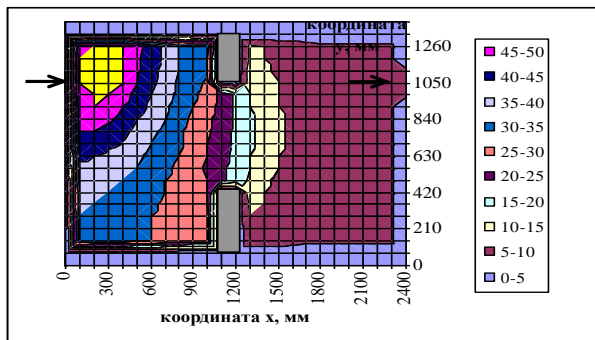


Рис. 6. Заполнение емкости сточной водой $t=6$

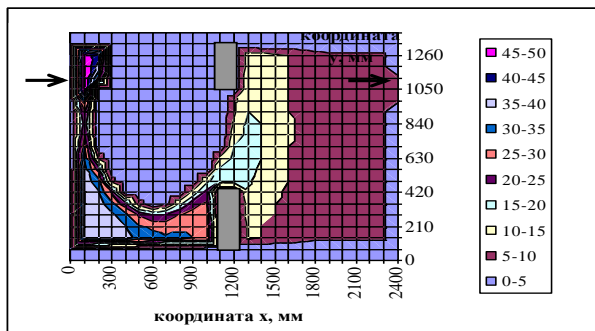


Рис. 7. Изменение концентрации кислоты с учетом поступления щелочи $t=6.8$

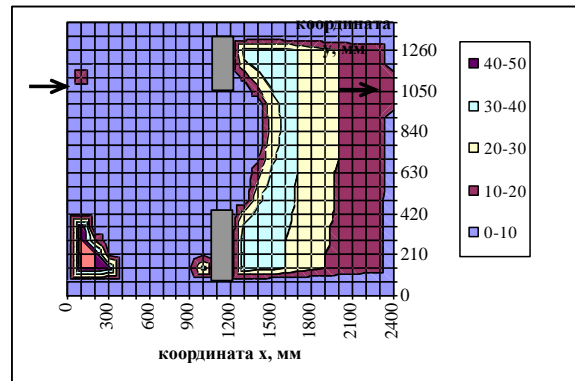


Рис. 8. Изменение концентрации кислоты с учетом поступления щелочи $t=7.8$

Расчет задачи требует порядка 5 с расчетного времени.

Выводы. Предложена новая CFD модель для расчета процесса нейтрализации кислых сточных вод в специальных емкостях. Особенностью модели является: возможность учета химического взаимодействия кислоты и реагента; расчет процесса массопереноса в области сложной геометрической формы.

Оперативность в проведении данного класса расчетов (менее 1 мин) является необходимым практическим инструментом для получения прогнозных данных, что важно при проведении серийных расчетов. Дальнейшее развитие этого направления следует проводить по созданию 3D модели.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Беляев, Н.Н. Математическое моделирование массопереноса в горизонтальных отстойниках [Текст] / Н.Н. Беляев, В.А. Козачина – Д.: Акцент ПП, 2014. – 114 с.
2. Водопостачання та очистка природних вод [Текст] / С.М. Епоян, В.Д. Колотило, О.Г. Друшляк, Г.І. Сухоруков, Т.С. Айрапетян – Х., 2010. – 183 с.
3. Інтенсифікація технологічних процесів комплексного очищення стічних вод промислово-урбаністичних центрів [Текст] / Н.А. Мешкова-Клименко, С.М. Епоян, М.Д. Гомеля, В.І. Нездоймінов, В.М. Чернишев – К., 2013. – 239 с.
4. Епоян, С.М. Метод підвищення ефективності змішування природної води з реагентом і методика проведення досліджень [Текст] / С.М. Епоян, Г.І. Сухоруков, В.А. Яркін // НВБ – 2016. – №1(83). – с. 187–193.

5. Ковальчук, В.А. Очистка стічних вод [Текст] / В.А. Ковальчук // Рівне, 2002. – 622 с.
6. Марчук, Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды [Текст] / Г.И. Марчук – М. : Наука, 1982. – 320 с.
7. Проектування мереж водовідведення стічних вод міста [Текст] / С.М. Епоян, І.В. Корінко, В.Г. Слепцов, Г.М. Смірнова, О.Г. Ісакієва – Х.: Каравела, 2004. – 124 с.
8. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде [Текст] / М.З. Згуровский, В.В. Скопецкий, В.К. Хрущ, Н.Н. Беляев – К. : Наук. думка, 1997. – 368 с.
9. Эпоян, С.М. Эффективное осветление воды в устройствах малой производительности [Текст] / С.М. Эпоян, А.С. Карагяур, А.Л. Скорик // Сучасні проблеми охорони довкілля та раціонального використання ресурсів у водному господарстві – К.: – 2012. – С. 19–21.
10. Эпоян, С.М. Безреагентная очистка воды от взвешенных веществ в установках малой производительности [Текст] / С.М. Эпоян, А.С. Карагяур, В.А. Сташук, А.В. Чунарев – Х.: – 2011. – Вып. 65. – С. 312 – 315.
11. Hendricks, David W. Water treatment unit processes: physical and chemical [Text] / David W. Handricks // CRC Press, 2006. – 1266 p.
12. Neutralization of Acidic Wastewater by the Use of Waste Limestone from the Marble Industry. Mechanistic Aspects and Mass Transfer Phenomena of the Acid–Base Reaction at the Liquid–Solid Interface / P. Domenico, P. Mario, B. Giancarlo, P. Calabrese, V. Petruzzelliand – Ind. Eng. Chem. Res. – 2014. – 53(7). – P. 2566–2571.
13. Wastewater Treatment-Physical and Chemical Methods [Text] / W. Walters Richard, L. Tarleton Amy, Grasso Domenic, Ibrahim Al-Ghusain, Yu-Ping Chin, Bryan W. West, Jeffrey A. Sullivan. – Vol. 61, No. 6, 1989: Literature Review Issue (Jun., 1989), P. 789–799.
14. Станция нейтрализации сточных вод. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ecovod.ru/stancia-neytralizacii-stochnykh-vod>

УДК 504.4.054

Проскурнин¹ О. А., Кирпичева² И.В. , Кононенко² А.В. , Третьякова² Н.В.

¹НИУ «Украинский НИИ экологических проблем», Г. Харьков,

²Луганский национальный аграрный университет, г. Харьков

РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЕЩЕСТВА В КОНТРОЛЬНОЙ ТОЧКЕ ВОДНОГО ОБЪЕКТА В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ СБРОСОВ СТОЧНЫХ ВОД

Одной из важнейших экологических проблем экономически развитых стран является загрязнение водных объектов (ВО) сточными водами (СВ), отводимыми от промышленных, коммунальных и сельскохозяйственных предприятий [1]. В соответствии с действующим водным законодательством [2, 3], для предприятий-водопользователей разрабатываются и утверждаются предельно допустимые сбросы (ПДС) загрязняющих веществ (ЗВ), поступающих в ВО со СВ. Методической базой для разработки и утверждения ПДС является «Инструкция по разработке и утверждению ПДС веществ в водные объекты с

возвратными водами» [4]. Согласно данной «Инструкции...», при неполном разбавлении СВ вывод о степени техногенного влияния на ВО делается по максимально загрязненной части потока воды вдоль контрольного створа.

Одна из проблем при расчете ПДС заключается в применении так называемого «принципа суперпозиции» при расчете максимально загрязненной части потока воды. Данный принцип широко используется в различных областях физики (в частности, в электродинамике и акустике) и представляет собой следующую закономерность: результат воздействия на