

УДК 628.3(075.8)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕЙТРАЛИЗАЦИИ КИСЛОТНЫХ СТОЧНЫХ ВОД НА БАЗЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ

БЕЛЯЕВ Н. Н.<sup>1</sup>, *д.т.н, проф.*,РУСАКОВА Т. И.<sup>2\*</sup> *к.т.н.*,ГУРИНА Е. В.<sup>3\*</sup>, *студ.*

<sup>1</sup> Кафедра «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепро, Украина, тел. +38(056) 373-15-09, e-mail: gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup> Кафедра «Аэрогидромеханика и энергомассоперенос», Днепропетровский национальный университет имени О. Гончара, ул. Казакова, 18, корп. № 14, 49010, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 776 82 05, e-mail: rusackovat@yandex.ru, ORCID 0000-0001-5526-3578

<sup>3\*</sup> Кафедра «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепро, Украина, тел. +38(056) 373-15-09, e-mail: gidravlika2013@mail.ru

**Аннотация.** *Цель.* Разработка численной модели для исследования процесса нейтрализации сточных вод, которая учитывает параметры поступления сточных вод и нейтрализатора: вид и концентрацию кислоты, которой загрязнены производственные сточные воды, расход и режим поступления отработанных вод на нейтрализацию, вид и концентрацию нейтрализатора. Оценка изменения концентрации кислоты в сточных водах под влиянием нейтрализатора: выявление участков, где происходит полная нейтрализация кислоты или наблюдается наличие «застойных зон». *Методика.* Разработана методика численного расчета концентрации кислоты в сточных водах под действием нейтрализатора (щелочи), которая основана на совместном решении гидродинамической задачи по определению компонент скорости движущегося водного потока внутри емкости и задачи по переносу примеси (кислоты или щелочи). Решение гидродинамической задачи базируется на численном интегрировании уравнения для потенциала скорости, а решение задачи по переносу примеси – на численном интегрировании уравнении конвективно-диффузионного переноса примеси с использованием неявных разностных схем. *Результаты.* На основе разработанной численной модели проведен ряд вычислительных экспериментов. В результате выполненных расчетов были получены и наглядно представлены поля концентрации кислоты в емкости для очистки, при ее заполнении сточной водой с течением времени. Показано изменение концентрации кислоты под действием нейтрализатора при разных вариантах его подачи (один источник подачи нейтрализатора или два), проведен сравнительный анализ и установлены закономерности изменения концентрации кислоты в поступивших сточных водах. *Научная новизна.* Предложена эффективная численная модель для расчета процессов гидродинамики и массопереноса в установке для нейтрализации кислотных сточных вод. Модель позволяет учесть ряд важных факторов, которые ранее не учитывались при математическом моделировании процесса нейтрализации: форму емкости, наличие в ней дополнительных элементов (локальных сужений), положение отверстий для подачи сточных вод и нейтрализующего раствора. *Практическая значимость.* Разработана численная модель, позволяющая оптимизировать процесс нейтрализации производственных сточных вод, содержащих щелочи и кислоты, которые образуются в технологических процессах многих отраслей промышленности.

*Ключевые слова:* щелочные и кислотные сточные воды; нейтрализация; концентрация примеси; численная модель; вычислительный эксперимент

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ КИСЛИХ СТІЧНИХ ВОД НА БАЗІ ЧИСЕЛЬНОЇ МОДЕЛІ

БІЛЯЄВ М. М.<sup>1</sup>, *д.т.н, проф.*,РУСАКОВА Т. І.<sup>2\*</sup>, *к.т.н.*,ГУРИНА Є. В.<sup>3\*</sup>, *студ.*

<sup>1</sup> Кафедра «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38(056) 373-15-09, e-mail: gidravlika2013@mail.ru, ORCID ID 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup> Кафедра «Аерогідромеханіка та енергомасоперенос», Дніпропетровський національний університет імені О. Гончара, вул. Казакова, 18, корп. № 14, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 776 82 05, e-mail: rusackovat@yandex.ru, ORCID 0000-0001-5526-3578

<sup>3\*</sup> «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38(056) 373-15-09, e-mail: gidravlika2013@mail.ru

**Анотація.** *Мета.* Розробка чисельної моделі для дослідження процесу нейтралізації стічних вод, яка враховує параметри надходження стічних вод і нейтралізатора: вид і концентрацію кислоти, якої забруднені виробничі стічні води, витрату і режим надходження відпрацьованих вод на нейтралізацію, вид і концентрацію нейтралізатора. Оцінка зміни

концентрації кислоти в стічних водах під впливом нейтралізатора: виявлення ділянок, де відбувається повна нейтралізація кислоти або спостерігається наявність «застійних зон». **Методика.** Розроблено методику чисельного розрахунку концентрації кислоти в стічних водах під дією нейтралізатора (лужного розчину), яка базується на спільному вирішенні гідродинамічної задачі по визначенню компонент швидкості рухомого потоку рідини та задачі по перенесенню домішки (кислоти або луку). Рішення гідродинамічної задачі базується на чисельному інтегруванні рівняння для потенціалу швидкості, а рішення задачі по перенесенню домішки – на чисельному інтегруванні рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки з використанням неявних різницевих схем. **Результати.** На основі розробленої чисельної моделі проведено ряд обчислювальних експериментів. В результаті виконаних розрахунків були отримані і наочно представлені поля концентрації кислоти в ємності для очищення, при її заповненні стічною водою за певний проміжок часу. Показано зміну концентрації кислоти під дією нейтралізатора при різних варіантах його подачі (одне джерело або два джерела подачі нейтралізатора), проведено порівняльний аналіз і встановлено закономірності зміни концентрації кислоти в стічних водах. **Наукова новизна.** Запропоновано ефективну чисельну модель для розрахунку процесів гідродинаміки і масопереносу в установці для нейтралізації кислотних стічних вод. Модель дозволяє врахувати ряд важливих факторів, які раніше не враховувалися при математичному моделюванні процесу нейтралізації: форму ємності, наявність в ній додаткових елементів (локальних звужень), положення отворів для подачі стічних вод і нейтралізуючого розчину. **Практична значимість.** Розроблено чисельну модель, що дозволяє оптимізувати процес нейтралізації виробничих стічних вод, що містять луки та кислоти, які утворюються в технологічних процесах багатьох галузей промисловості.

*Ключові слова:* лужні і кислотні стічні води; нейтралізація; концентрація домішки; чисельна модель; обчислювальний експеримент

## RESEARCH OF THE PROCESS NEUTRALIZATION OF ACID WASTE WATER BASED ON THE NUMERICAL MODEL

BILIAIEV M. M.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
RUSAKOVA T. I.<sup>2\*</sup>, *Cn. Sc. (Tech.)*,  
GURINA E. V.<sup>3\*</sup>, *student*

<sup>1</sup> Department of «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2, Lazaryan St., 49010, Dnipro, Ukraine, tel. +38(056) 373-15-09, e-mail: gidravlika2013@mail.ru, ORCID ID 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup> Department of «Aerohydrodynamics and Masstransfer», Oles Gonchar Dnipropetrovsk National University, 18, Kazakov St., 49010, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 776 82 05, e-mail rusakovat@yandex.ru, OCID 0000-0001-5526-3578

<sup>3\*</sup> Department «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2, Lazaryan St., 49010, Dnipro, Ukraine, tel. +38(056) 373-15-09, e-mail: gidravlika2013@mail.ru

**Abstract. Purpose.** The development of a numerical model for the study of the wastewater neutralization process, which considers the parameters of sewage and neutralizer input: the type and concentration of acid contaminated with industrial wastewater, the rate and regime of waste water supply for neutralization, the type and concentration of the neutralizer. Assessment of the change in acid concentration in wastewater under the influence of a neutralizer: identification of sites where complete acid neutralization occurs or «stagnant zones» are observed. **Methodology.** The method is developed for numerical calculation the acid concentration in wastewater under the action of a neutralizer (alkali), which is based on the joint solution of the hydrodynamic problem of determining the velocity components of a moving fluid and the problem of impurity transfer (acid or alkali). The solution of the hydrodynamic problem is based on the numerical integration of the equation for the velocity potential, and the solution of the impurity transfer problem is the numerical integration of the equation of convective-diffusion impurity transport using implicit difference schemes. **Findings.** Computational experiments were carried out on the basis of the developed numerical model. As a result of the performed calculations, the fields of acid concentration in the purification tank were obtained and visually represented, when it was filled with sewage water over time. The change in the concentration of the acid under the action of the neutralizer is shown with different variants of its supply (one source of the neutralizer supply or two), a comparative analysis is carried out, and the patterns of acid concentration change in the received wastewater are established. **Originality.** An effective numerical model is proposed for calculating the processes of hydrodynamics and mass transfer in an installation for neutralizing acid waste water. The model allows to take into account a number of important factors that were not taken into account in the mathematical modeling of the neutralization process: the shape of the container, the presence of additional elements (local constrictions), the position of the holes for the supply of sewage and neutralizing solution. **Practical value.** A numerical model has been developed that makes it possible to optimize the process of neutralizing industrial wastewater containing alkalis and acids that are formed in the technological processes of many industries.

**Keywords:** alkaline and acid waste water; neutralization; impurity concentration; numerical model; computer experiment

### Введение

Производственные сточные воды многих отраслей промышленности содержат щелочи и

кислоты. В большинстве кислых стоков содержатся соли тяжелых металлов, которые необходимо выделять из сточных вод. С целью предупреждения коррозии материалов канализационных очистных

сооружений, нарушения биохимических процессов в биологических окислителях и в водоемах, а также для осаждения из сточных вод солей тяжелых металлов кислые и щелочные стоки подвергают нейтрализации.

Реакция нейтрализации – это химическая реакция между веществом, имеющим свойства кислоты, и основания, которая приводит к потере характерных свойств обоих соединений. При спуске производственных сточных вод в водоем или в городскую канализационную сеть практически нейтральными следует считать смеси с  $pH=6,5-8,5$ . Учитывая нейтрализующую способность водоема и щелочной резерв городских сточных вод, подвергать нейтрализации следует сточные воды с  $pH$  менее 6,5 и более 8,5. Наибольшую опасность представляют кислые стоки, которые встречаются в сбросе производственных стоков значительно чаще, чем щелочные. Если отработанные производственные сточные воды подаются в систему оборотного водоснабжения, то требования к величине активной реакции зависят от специфики технологических процессов.

Наиболее часто сточные воды загрязнены минеральными кислотами: серной  $H_2SO_4$ , азотной  $HNO_3$ , соляной  $HCl$ , а также их смесями. Значительно реже в сточных водах встречаются: азотистая  $HNO_2$ , фосфорная  $H_3PO_4$ , сернистая  $H_2SO_3$ , сероводородная  $H_2S$ , плавиковая  $HF$ , хромовая  $H_2CrO_4$  кислоты, а также органические кислоты – уксусная, пикриновая, салициловая.

Концентрация кислот в сточных водах обычно не превышает 3%. В отдельных производствах органического синтеза содержание серной кислоты в сточных водах составляет 40% и более.

При химической очистке применяют следующие способы нейтрализации:

а) взаимная нейтрализация кислых и щелочных сточных вод;

б) нейтрализация реагентами (растворы кислот, негашеная известь  $CaO$ , гашеная известь  $Ca(OH)_2$ , кальцинированная сода  $Na_2CO_3$ , каустическая сода  $NaOH$ , аммиачная вода  $NH_4OH$ );

в) фильтрование через нейтрализующие материалы (известь, известняк  $CaCO_3$ , доломит  $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ , магнезит  $MgCO_3$ , обожженный магнезит  $MgO$ ).

Выбор способа нейтрализации зависит от многих факторов: вида концентрации кислот, загрязняющих производственные сточные воды, расхода и режима поступления отработанных вод на нейтрализацию, наличия реагентов. При нейтрализации смешением кислых сточных вод со щелочными учитывается, что режимы сброса сточных вод, содержащих кислоту и отработанную щелочь, как правило, различны. Кислые воды обычно сбрасываются в канализацию

равномерно в течение суток и имеют постоянную концентрацию, щелочные воды сбрасываются периодически один или два раза в смену по мере того, как срабатывает щелочной раствор. В связи с этим для щелочных вод часто необходимо устанавливать регулирующий резервуар, объем которого должен быть достаточным, чтобы принять суточное количество щелочных вод. Из резервуара щелочные воды равномерно выпускают в камеру реакции, где в результате смешения их с кислыми водами происходит взаимная нейтрализация.

Анализ литературных источников показал, что проблемой очистки сточных вод широко занимаются как в Украине, так и зарубежом. В работах отечественных авторов 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, с учетом структуры водоотведения [7]. Зарубежными авторами предлагаются математические модели физико-химических методов очистки сточных вод промышленных предприятий [9–13]. Большинство работ отечественных и зарубежных авторов касается применения эмпирических зависимостей для расчетов нейтрализации кислых вод, 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. Зарубежными авторами также используются готовые пакеты для компьютерного моделирования, типа Aspen [10]. Поэтому остается актуальной необходимость создания эффективных методов численного расчета для осуществления процесса нейтрализации сточных вод в специальных установках, которые позволяют провести расчет процесса нейтрализации с учетом практически всех факторов влияющих на этот процесс.

### Цель

Целью работы является создание численной модели процесса нейтрализации кислых сточных вод в ёмкостях для нейтрализации с учетом расположения и количества источников подачи нейтрализатора.

### Математическая модель

Моделирование процесса нейтрализации осуществляется в два этапа:

- на первом этапе рассчитывается поле скорости водного потока внутри установки (рис. 1–2) – гидродинамическая модель процесса;
- на втором этапе рассматривается движение

сточных вод, содержащих кислоту и раствор щелочи – решается задача массопереноса.

В предложениях компаний имеется два типа станций, предлагаемых заказчиком для нейтрализации стоков объемом от 2000 л до 20000 л: проточный и контактный. Проточные типы установок эффективны при значительных расходах стоков, контактные – при их небольших количествах. В данной работе рассматривается установка проточного типа в двух вариантах: первый – один источник подачи нейтрализатора (рис. 1, положение 2), второй – два источника подачи нейтрализатора (рис. 2, положение 2).

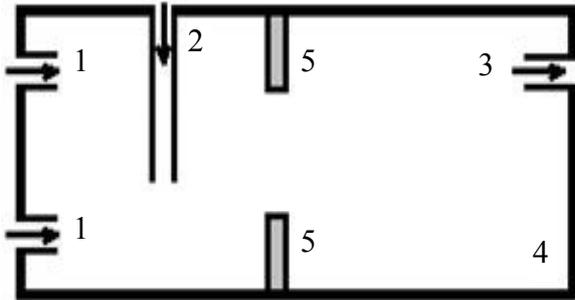


Рис. 1. Схема расчетной области для нейтрализации проточного типа (вариант 1): 1 – кислые сточные воды, 2 – щелочные сточные воды, 3 – нейтрализованная сточная вода, 4 – емкость, 5 – локальные сужения /

Scheme of calculation for neutralization of flow type (option 1): 1 – acid waste water, 2 – alkaline wastewater, 3 – neutralized wastewater, 4 – capacity, 5 – local narrowing

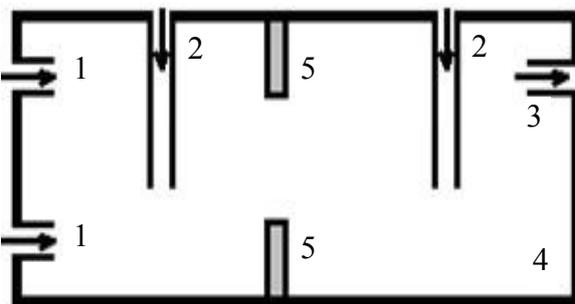


Рис. 2. Схема расчетной области для нейтрализации проточного типа (вариант 2): 1 – кислые сточные воды, 2 – щелочные сточные воды, 3 – нейтрализованная сточная вода, 4 – емкость, 5 – локальные сужения /

Scheme of calculation for neutralization of flow type (option 2): 1 – acid waste water, 2 – alkaline wastewater, 3 – neutralized wastewater, 4 – capacity, 5 – local narrowing

На первом этапе моделирующим уравнением является уравнение Лапласа для потенциала скорости [1, 6].

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0 \tag{1}$$

где  $P$  – потенциал скорости, ось  $Oy$  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:  $\frac{\partial n}{\partial n} = 0$ , где  $n$  – единичный вектор внешней нормали к твердой стенке;

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

- на границе, где водный поток выходит из емкости (рис. 1, положение 3)  $P = P_0 + const$ , где  $P_0$  – некоторое число (условие Дирихле).

Как известно, раствор гидроксида кальция  $Ca(OH)_2$  широко используется в химической, пищевой, металлургической и других отраслях промышленности, в строительной индустрии, в производстве потребительских товаров и материалов для их изготовления.

Так при нейтрализации серной кислоты гидроксидом кальция (щелочью) происходит следующая реакция



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

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \sum Q_i \delta(x - x_i)(y - y_i) \tag{3}$$

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.

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

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

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  $\varepsilon$  – 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 (3) проводится с помощью неявной разностной схемы расщепления [8].

Алгоритм решения 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 (щелочи); определяется концентрационное поле реагента внутри емкости на момент времени  $t_n$ ;

- на четвертом этапе в каждой разностной ячейке происходит перерасчет концентрации кислоты и реагента (щелочи) вследствие их химического взаимодействия определяемого стехиометрическим соотношением. Полагается, что химическая реакция протекает на временном промежутке  $\Delta t$ .

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

### Результаты

Возможности практического использования разработанной численной модели реализуются быстрым расчетом рассматриваемых вариантов процесса нейтрализации, который происходит в два этапа. На первом этапе идет заполнение емкости сточной водой, содержащей кислоту, через два патрубка в течение времени от 0 до  $t_1$  (рис. 3–4). Концентрация кислоты представлена в процентах от

максимального значения на входе поступления в емкость.

В момент времени  $t_1$  начинается второй этап – подача щелочи: один источник подачи щелочи (рис. 1), два источника подачи щелочи (рис. 2). На рис. 5–6 показано изменение концентрации кислоты в сточных водах после начала поступления щелочи при первом варианте расчета, на рис. 7–8 – при втором варианте расчета. Хорошо видно, что подача щелочи резко изменяет содержание кислоты в сточных водах внутри установки.

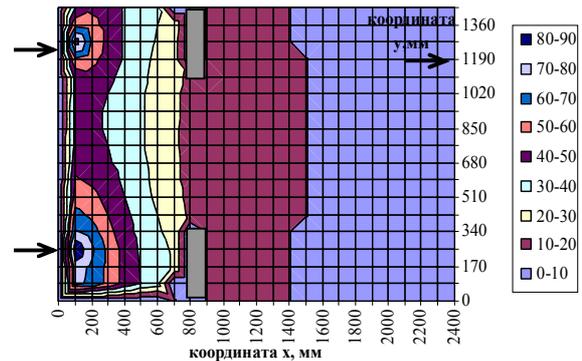


Рис. 3. Заполнение емкости сточной водой  $t=2$  с / Filling the tank with wastewater  $t = 2$  s

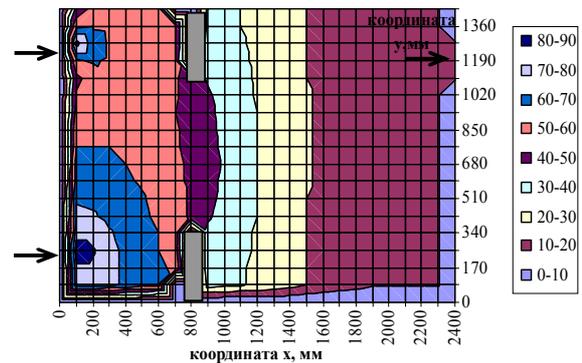


Рис. 4. Заполнение емкости сточной водой  $t=6$  с / Filling the tank with wastewater  $t = 6$  s

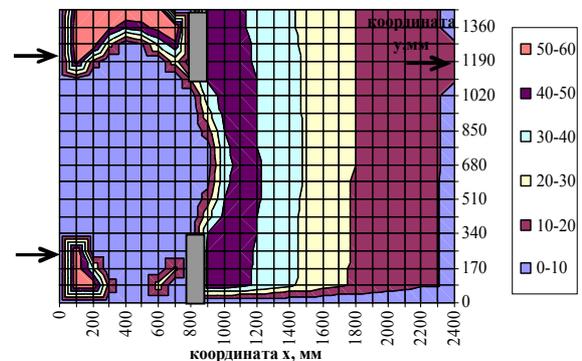


Рис. 5. Изменение концентрации кислоты с учетом поступления щелочи  $t=6,2$  с (первый вариант) / Change in acid concentration taking into account

*alkali intake  $t = 6,2$  s (first variant)*

При первом варианте расчета процесс нейтрализации происходит последовательно, сдвигаясь от участка входа сточных вод к выходному отверстию, к моменту времени  $t = 8$  с процесс нейтрализации практически завершается. Во втором варианте расчета, процесс нейтрализации происходит практически мгновенно в течение нескольких секунд, а далее емкость заполняется нейтрализатором, т.е. необходимо уменьшить его подачу.

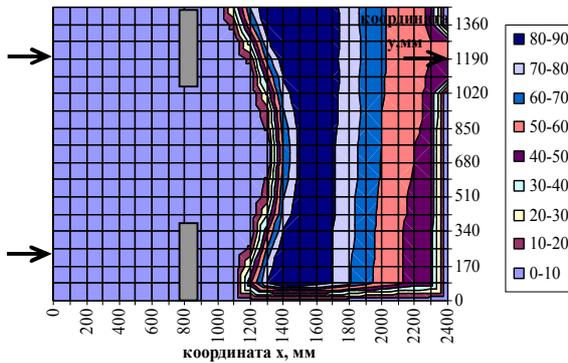


Рис. 6. Изменение концентрации кислоты с учетом поступления щелочи  $t=6,6$  с (первый вариант) / Change in acid concentration taking into account alkali intake  $t = 6,6$  s (first variant)

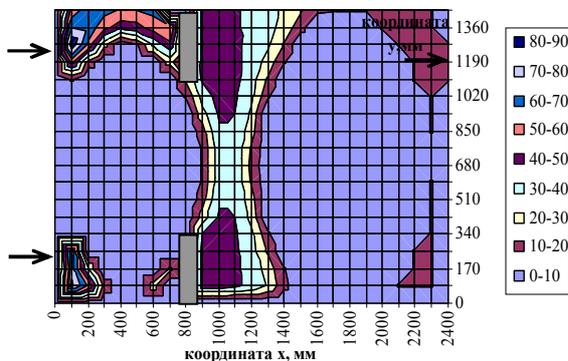


Рис. 7. Изменение концентрации кислоты с учетом поступления щелочи  $t=6,2$  с (второй вариант) / Change in acid concentration taking into account alkali intake  $t = 6,2$  s (second variant)

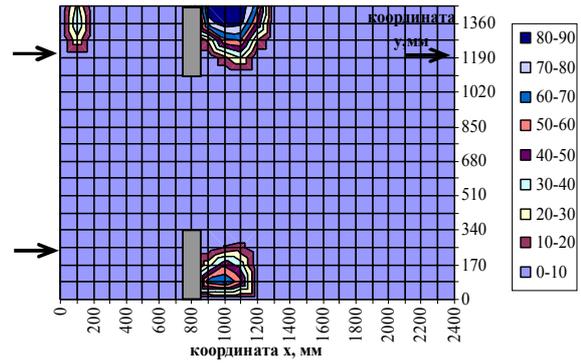


Рис. 8. Изменение концентрации кислоты с учетом поступления щелочи  $t=6,4$  с (второй вариант) / Change in acid concentration taking into account alkali intake  $t = 6,4$  s (second variant)

Анализ изменения концентрации кислоты во втором варианте расчета (рис.8) показывает, что наличие двух источников подачи щелочи ускоряет процесс нейтрализации, но образуются «застойные» зоны возле вставок (локальных сужений), находящихся внутри устройства. Нейтрализатор не доходит в эти зоны, что снижает качество обработки сточных вод.

#### Научная новизна и практическая значимость

Предложена эффективная численная модель для расчета процессов гидродинамики и массопереноса в установке для нейтрализации кислотных сточных вод. Модель позволяет учесть ряд важных факторов, которые ранее не учитывались при математическом моделировании процесса нейтрализации: форму емкости, наличие в ней дополнительных элементов, положение отверстий для подачи сточных вод, положение отверстий для подачи нейтрализующего раствора.

#### Выводы

Разработана численная модель, позволяющая оптимизировать процесс нейтрализации кислотных сточных вод. Модель основывается на применении фундаментальных уравнений гидродинамики и массопереноса. Дальнейшее развитие этого направления следует проводить в области разработки 3D модели процесса нейтрализации кислотных сточных вод.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Беляев, Н.Н. Математическое моделирование массопереноса в горизонтальных отстойниках / Н.Н. Беляев, В.А. Козачина. – Днепропетровск: Акцент ПП, 2014. – 114 с.
2. Водопостачання та очистка природних вод / С.М. Епоян, В.Д. Кологитло, О.Г. Друшляк, Г.І. Сухоруков, Т.С. Айрапетян. – Харків: Харк. держ. техн. ун-т буд-ва та архіт, 2010. – 183 с.

3. Інтенсифікація технологічних процесів комплексного очищення стічних вод промислово-урбаністичних центрів / Н.А. Мешкова-Клименко, С.М. Епоян, М.Д. Гомеля, В.І. Нездоймінов, В.М. Чернишев. – Київ: ТОВ ТО Ексклюзив, 2013. – 239 с.
4. Епоян, С.М. Метод підвищення ефективності змішування природної води з реагентом і методика проведення досліджень / С.М. Епоян, Г.І. Сухоруков, В.А. Яркін // Науковий вісник будівництва – 2016. – №1(83). – с. 187–193.
5. Ковальчук, В.А. Очистка стічних вод / В.А. Ковальчук. – Рівне: Рівненська друкарня, 2002. – 622 с.
6. Марчук, Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г.И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
7. Проектування мереж водовідведення стічних вод міста / С.М. Епоян, І.В. Корінко, В.Г. Слєпцов, Г.М. Смірнова, О.Г. Ісакієва. – Харків: Каравела, 2004. – 124 с.
8. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М.З. Згуровский, В.В. Скопецкий, В.К. Хрущ, Н.Н. Беляев – Київ : Наук. думка, 1997. – 368 с.
9. Alwan, Dr. G. M. pH-Control Problems of Wastewater Treatment Plants / Dr. G. M. Alwan // Al-Khwarizmi Engineering Journal. – 2008. – Vol. 4. – No. 2. – P. 37 – 45.
10. Damons R. E. An Aspen Model for the Treatment of Acid Mine Water / R. E. Damons and F. W. Petersen // The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection. – 2002. – Vol. 2. – No. 2. – P. 69 – 81.
11. Kang, J. Modeling and Control of pH in Pulp and Paper Wastewater Treatment Process / J. Kang, M. Wang // J. Water Resource and Protection. – 2009. – Vol. 12. – P. 122–127.
12. Mathematical Modeling and Development of a Low Cost Fuzzy Gain Schedule Neutralization Control System / Rodrigo Sislian, Flávio Vasconcelos da Silva, Rubens Gedraite, Heikki Jokinen and Dhanesh Kattippambal Rajan // Engineering Letters. – 2016. – Vol. 24. – P. 3–16.
13. Sam Justus A. Model Based Controller of pH Neutralization in Waste Water Treatment Process / Sam Justus A, Mr. Kingston Stanley // International Journal Of Innovative Research In Technology. – 2014. – Vol. 1. – Iss. 8. – P. 106 – 111.

## REFERENCES

1. Belyaev N.N., Kozachina V.A. *Matematicheskoye modelirovaniye massoperenosa v gorizontalnykh otstoynikakh* [Mathematical modeling of mass transfer in horizontal sedimentation tanks]. Dnipropetrovsk: Aktsent PP Publ., 2014, 114 p. (in Ukrainian).
2. Yepoyan S.M., Kolotilo V.D., Drushlyak O.G., Sukhorukov G.Í., Ayrapetyan T.S. *Vodopostachannya ta ochistka prirodnykh vod* [Water supply and purification of natural waters]. Kharkov: Kharkivsky derzhavnyy tekhnichnyy universytet budivnytstva ta arkhitektury, 2010, 183 p. (in Ukrainian).
3. Myeshkova-Klymenko N.A., Epoyan S.M., Homelya M.D., Nezdoyminov V.I., Chernyshev V.M. *Intensyfikatsiya tekhnolohichnykh protsesiv kompleksnoho ochyshchennya stichnykh vod promyslovo-urbanistychnykh tsestriv* [Intensification of processes of complex industrial wastewater treatment urban centers]. Kiev: TOV TO Eksklyuzyv, 2013, 239 p. (in Ukrainian).
4. Epoyan S.M., Sukhorukov H.I., Yarkin V.A. *Metod pidvyshchennya efektyvnosti zmishuvannya pryrodnoyi vody z reahentom i metodyka provedennya doslidzhen* [Method of improving the efficiency of natural water mixing with the reagent and method of research]. *Naukovyy visnyk budivnytstva* – [Scientific Herald of construction]. Kharkov, 2016, no. 1(83), pp. 187–193. (in Ukrainian).
5. Kovalchuk V.A. *Ochystka stichnykh vod* [Cleaning of drains]. Rivne: Rivne printing, 2002, 622 p. (in Ukrainian).
6. Marchuk G.I. *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushhey sredy* [Mathematical modelling in the environmental problem]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 320 p. (in Russian).
7. Epoyan S.M., Korinko I.V., Sleptsova V.G., Smirnov G.M., Isakiyeva O.G. *Proektuvannya merezh vodovidvedennya stichnykh vod mista* [Design of sewage system of the city sewage]. Kharkov: Caravel, 2004, 124 p. (in Ukrainian).
8. Zgurovskiy M.Z., Skopetskiy V.V., Khrushch V.K., Belyayev N.N. *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede* [Numerical modelling of pollution in the environment]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1997, 368 p. (in Ukrainian).
9. Alwan Dr. G.M. pH-Control Problems of Wastewater Treatment Plants // Al-Khwarizmi Engineering Journal, 2008, Vol. 4, No. 2, pp. 37 – 45.
10. Damons R. E. and Petersen F. W. An Aspen Model for the Treatment of Acid Mine Water // The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection, 2002, Vol. 2, No. 2, pp. 69 – 81.
11. Kang J., Wang M. Modeling and Control of pH in Pulp and Paper Wastewater Treatment Process // J. Water Resource and Protection, 2009, Vol. 12, pp. 122–127.
12. Rodrigo Sislian, Flávio Vasconcelos da Silva, Rubens Gedraite, Heikki Jokinen and Dhanesh Kattippambal Rajan *Mathematical Modeling and Development of a Low Cost Fuzzy Gain Schedule Neutralization Control System* // Engineering Letters, 2016, Vol. 24, pp. 3–16.
13. Sam Justus A, Mr. Kingston Stanley *Model Based Controller of pH Neutralization in Waste Water Treatment Process* // International Journal Of Innovative Research In Technology, 2014, Vol. 1, Iss. 8, pp. 106 – 111.

*Статья рекомендована к публикации д-ром. техн. наук, проф. С. З. Полищуком (Украина)*

Поступила в редколлегию 29.03.2017