УДК 627.81.001.57:628.179.2

ДВИЖЕНИЕ ВОДНЫХ ПОТОКОВ В АППАРАТАХ ЛОКАЛЬНОГО ВОДООЧИСТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ (В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ)

Мовчан[1] С.И., Николенко[2] И.В.

[1]ФГБОУ ВО «Мелитопольский государственный университет»
272312 Запорожская область, г. Мелитополь, проспект Б. Хмельницкого, 18
e-mail:msi.movchan@mail.ru
[2]ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им В.И. Вернадского»,
Институт «Академия строительства и архитектуры»,
295493, Республика Крым, г. Симферополь, улица Киевская, 181.
E-mail: nikoshi@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы движения водных потоков восходящими/нисходящими потоками внутри аппаратов круглого сечения, что позволяет оптимизировать процессы обработки сточных вод, снизить гидравлическую нагрузку, уменьшить гидравлические сопротивления и оптимизировать работу водоочистное оборудование. Используя общеизвестные законы сохранения количества движения, в ограниченных объёмах аппаратах водоочистного оборудования, позволяют использовать дифференциальные уравнения, описывающие движение водных потоков.
По аналогии движения водных потоков, авторами рассмотрено метод расчёта аэрационной системы, позволяющий для каждого конкретного случая рассчитать оптимальный вариант – в зависимости от конструктивных параметров, их количества диаметра оборудования, что определяет эффективность работы оборудования.
С учётом теоретических условий обосновано использование дифференциальных условий неразрывности водного потока и уравнения движения идеальной жидкости (уравнения Эйлера), являющиеся основой для исследования процесса динамики и переноса загрязняющих веществ.
Предмет исследования: локальное водоочистное оборудование в которых движутся водные потоки упорядочено дифференциальными уравнениями неразрывности и уравнением Бернулли, рассматривающими движение водных потоков от элементарной струйки к потоку реальной жидкости.
Материалы и методы: Для оценки определения характеристик движения встречными потоками рассмотрены условия в напорной системе, когда водный поток ограничен размерами аппаратами, в которых происходит обработка сточных вод в системах оборотного водоснабжения промышленных предприятий. Движение водных потоков обусловлено различными камерами (этапами), определяющие непосредственно эффективность обработки сточных вод.
Результаты: моделирование системы позволяет выделенный объём жидкости, внутри аппаратов локального водоочистного оборудования, оптимизировать объёмы сточных вод и сопутствующих водных ресурсов.
Основные выводы: С учётом общеизвестных уравнений неразрывности потока и уравнения Бернулли, определены оптимальные условия работы водоочистного оборудования, что позволяет оптимизировать технологический процесс, снизить гидравлические нагрузки и повысить уровень обработки сточных вод промышленных предприятий.

Ключевые слова: водоочистка, оборотные системы, водный поток, аппараты, локальное оборудование, элементарный объём, масса жидкости, объём водных ресурсов.

Работа выполнена в рамках Государственного заказа на оказание государственных услуг (выполнение работ) № 075-00656-26-04 от 20.05.2026 г. «Водоподготовка для обеспечения требуемого качества воды из поземных источников, используемой при орошении сельскохозяйственной продукции и продукции садов южных регионов» (FRRS 2026-0015)»

ВВЕДЕНИЕ

Проблема очистки сточных является актуальной народнохозяйственной задачей для различных отраслей хозяйственной деятельности. Непосредственно это является важным для промышленного сектора и водохозяйственного комплекса страны, для предприятий использующих воду и водные ресурсы в своих технологических операциях и циклах промышленного производства.

Одним из важных условий работы водоочистного оборудования является обоснование выбора, конструкторско-технологический расчёт отдельных операций и обоснование эффективности использования того или иного вида сточных вод, образующихся на предприятиях различной направленности.

Кроме того, исследование водных потоков являются основой для проектирования и расчёта водоочистного оборудования промышленных предприятий различной направленности, в частности предприятий машиностроительного комплекса, цветной и чёрной обработки металлов, ремонтных предприятий и др., на которых водоочистное оборудование определяет интенсивность и характер направленной производственной деятельности

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Процессы обработки сточных воды являются сложной многостадийной стадией системы водоснабжения промышленных предприятий. Постоянная разработка новых технологических решений, усовершенствование существующих

технологий водообработки является характерным направлением развития и совершенствования водохозяйственного комплекса.

В последнее время, многократное и повторное использования воды и водных ресурсов, характеризуется внедрением и использованием «попутных технологий», которые непосредственно рассматриваются в работах. Авторами представлены результаты исследования и внедрения «попутных технологий», очистки промышленных сточных вод различных составов. Показаны пути использования отработанных растворов в технологических схемах очистки сточных вод. Представлены ресурсосберегающие схемы очистки сточных вод [1, 2].

В учебно-методическом пособии рассмотрены вопросы технологии подготовки, обработки сточных вод, т. ч. критериев оценки нормативов качества питьевой воды, выбора и обоснования технологических схем очистки и кондиционирования природных вод с использованием классификатора технологий, технологического и технического аудита, а также анализа эффективности водоочистного комплекса в целом [3].

Основные задачи, связанные с организацией и технической эксплуатацией систем и сооружений водоснабжения и водоотведения рассмотрены и изложены в учебном пособии. Уделено внимание разъяснению существующих нормативных требований по организации технической эксплуатации систем водоснабжения и водоотведения [4].

От правильного выбора водоочистного оборудования зависит надёжность всего процесса обработки сточных вод, но и движение водного потока внутри оборудования технологического оборудования.

Основные понятия о надежности систем водоснабжения и водоотведения и их элементов, приведены методика и оценка численных показателей их надежности и факторов, формирующих их изменение, дефекты водопроводных и водоотводящих трубопроводов и их причины, новые подходы к планированию реконструкции и восстановления трубопроводов, инженерно-технические мероприятия по обеспечению их надежности излагаются авторами в работе [5].

Обснование направление исследований

Существующие математические модели и методы расчёта перенесения примесей в потоках водных растворов базируются на допущениях и предположениях про изотропность коэффициентов турбулентной вязкости и диффузии, что приводит к искажению реальной картины переноса примесей вблизи источника выброса [6, 7].

При моделировании движения водных потоков, на встречных направлениях в ограниченном пространстве, базирующихся на неразрывности потока, сохранение материального и энергетического балансов, учитывая общую массу и энергии веществ во входных потоках и на их выходе. При этом рассматриваются условия минимальных потерь материального баланса воды и водных ресурсов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

1. Обоснование выбора исследований

По аналогии движения водных потоков, авторами предложен метод расчёта аэрационной системы, позволяющий для каждого конкретного случая рассчитать оптимальный вариант – в зависимости от конструктивных параметров, их количества диаметра оборудования, что определяет эффективность работы оборудования [8].

Конструктивные параметры водоочистного оборудования непосредственно влияют на распределение водных потоков и являются важным фактором эффективной работы водоочистного оборудования.

Учитывая, вышеперечисленные факторы, уравнение движения жидкости вдоль пути с переменным расходом [9] после ряда допущений и ряда упрощающих предположений можно записать в следующем виде [10]:

$$\frac{dp}{\rho} + udu + \left(u^2 \cdot \frac{dG}{G}\right) \cdot \xi \cdot \frac{u^2}{2} \cdot \frac{dx}{D} = 0 \quad (1)$$

где p – статистическое давление в коллекторе, мПа;
ρ - плотность исследуемого компонента и/или компонентов, кг/м3;
u - локальная осевая скорость, м/с;
ζ - коэффициент сопротивления трения;
x - продольная координата;
D - внутренний диаметр оборудования, м.

2. Теоретическое обоснование использование дифференциальное уравнение неразрывности

В потоке жидкости выделим мысленно элементарный объём в форме параллелепипеда круглого поперечного сечения с гранями dx, dy, dz, параллельными соответствующим координатным осям (рис. 1) [11]. На основании закона сохранения массы запишем:

$$dM_x = \left[\rho \cdot u_x - \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial \cdot (\rho \cdot u_x)}{\partial x} \cdot dx\right] \cdot dy \cdot dz \ , \quad (2)$$

$$dM_x^{\text{I}} = \left[\rho \cdot u_x - \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial \cdot (\rho \cdot u_x)}{\partial x} \cdot dx\right] \cdot dy \cdot dz \ , \quad (3)$$

где dMX - масса жидкости, протекающая через грань параллелепипеда за единицу времени, кг;
u - скорость в центре вертикально расположенного параллелепипеда круглого сечения — в точке А, м/с;
ρ - плотность жидкости в точке А, кг/м3;
dM'X - масса жидкости, вытекающая через противоположную грань a'b'c'd', кг.

Схема к выводу уравнения неразрывности для потока жидкости, проходящего через локальное водоочистное оборудование, представлено на рис. 1.

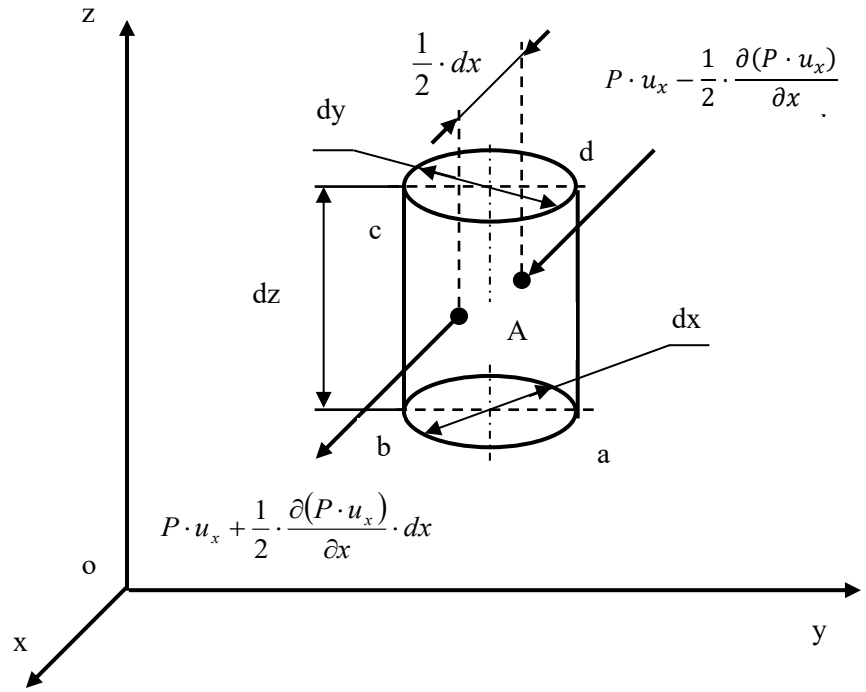


Рис. 1. Схема к выводу уравнения неразрывности водного потока для жидкости, проходящей через локальное водоочистное оборудование вертикально расположенное
Fig. 1. Diagram for the derivation of the continuity equation for a water flow passing through vertically oriented local water treatment equipment.

Приток массы жидкости в данном элементарном объеме в направлении оси Ox за единицу времени составит:

$$dM_x - dM_x^{\text{I}} = -\frac{\partial (\rho \cdot u_x)}{\partial x} dx \cdot dy \cdot dz \ . \quad (4)$$

Аналогично в направлении Oy составляет:

$$\frac{\partial (\rho \cdot u_y)}{\partial y} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \ , \quad (5)$$

а в направлении оси Oz:

$$\frac{\partial (\rho \cdot u_z)}{\partial z} dx \cdot dy \cdot dz \ . \quad (6)$$

Полное изменение массы в объёме параллелепипеда за единицу времени равно:

$$-\left[\frac{\partial\cdot(\rho\cdot u_x)}{\partial x}+\frac{\partial\cdot(\rho\cdot u_y)}{\partial y}+\frac{\partial\cdot(\rho\cdot u_z)}{\partial z}\right]\cdot dx\cdot dy\cdot dz\ . \quad (7)$$

Увеличение или уменьшение массы жидкости в данном её объёме может быть за счет изменения ее плотности. Изменение массы, отнесённое к единице времени, будет:

$$\frac{\partial}{\partial t}\cdot(\rho\cdot dx\cdot dy\cdot dz)\ . \quad (8)$$

Полученные два выражения массы приравняем, получим:

$$-\left[\frac{\partial\cdot(\rho\cdot u_x)}{\partial x}+\frac{\partial\cdot(\rho\cdot u_y)}{\partial y}+\frac{\partial\cdot(\rho\cdot u_z)}{\partial z}\right]=\frac{\partial\rho}{\partial t}\ , \quad (9)$$

$$\rho\cdot\left(\frac{\partial u_x}{\partial x}+\frac{\partial u_y}{\partial y}+\frac{\partial u_z}{\partial z}\right)+\frac{\partial\rho}{\partial t}=0\ , \quad (10)$$

Полученное уравнение представляет собой уравнение неразрывности в дифференциальной форме для сжимаемой жидкости.

Если жидкость несжимаема, p=const, то $\rho\cdot\left(\frac{\partial u_x}{\partial x}+\frac{\partial u_y}{\partial y}+\frac{\partial u_z}{\partial z}\right)+\frac{\partial\rho}{\partial t}=0$ и уравнение неразрывности получает вид:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x}+\frac{\partial u_y}{\partial y}+\frac{\partial u_z}{\partial z}=0. \quad (11)$$

Это уравнение представляет собой дивергенцию (расхождение) вектора скорости и записывается в виде divu = 0.

Тогда уравнение неразрывности сжимаемой жидкости имеет вид:

$$\frac{1}{\rho}\cdot\frac{\partial\rho}{\partial t}+divu=0\ . \quad (12)$$

Физический смысл уравнения (11) заключается в том, что секундные объемы жидкости, одновременно поступающие в данный фиксированный объем пространства и вытекающие из него, равны.

Применительно, к данному вертикально расположенному параллелепипеду круглого сечения, необходимо учитывать объём круглого сечения, определяемого по формуле:

$$V=\frac{\pi\cdot d^2}{4}\cdot H\ . \quad (13)$$

где d – диаметр аппарата, м; H – общая высота аппарата, м.

3. Дифференциальные уравнения движения идеальной жидкости (уравнения Эйлера)

Ранее мы рассматривали уравнения покоя жидкости. Эти уравнения были отнесены к единице массы жидкости. Дифференциальные уравнения движения идеальной жидкости легко получить из уравнений покоя, если ввести в эти уравнения силу инерции, отнесенную к единице массы движущейся жидкости.

Проекции на оси x, y и z силы инерции, отнесенной к единице массы жидкости, запишутся в виде:

$$J_x=-\frac{du_x}{dt}\ ;J_y=-\frac{du_y}{dt}\ ;\ J_z=-\frac{du_z}{dt}\ . \quad (14)$$

$$\frac{du_x}{dt}\ ;\frac{du_y}{dt}\ ;\ \frac{du_z}{dt}\ , \quad (15)$$

проекции ускорений на соответствующие оси координат. Сила инерции направлена в сторону, противоположную ускорению; поэтому в соотношения войдет знак минус.

$$\begin{cases} X-\frac{1}{\rho}\cdot\frac{\partial P}{\partial x}=\frac{du_x}{dt}, \\ Y-\frac{1}{\rho}\cdot\frac{\partial P}{\partial y}=\frac{du_y}{dt}, \\ X-\frac{1}{\rho}\cdot\frac{\partial P}{\partial z}=\frac{du_z}{dt}. \end{cases} \quad (16)$$

Эти уравнения называются уравнениями Л. Эйлера. В общем случае величины ux, uy и uz являются функциями координат и времени. Поэтому полный дифференциал, например, dux, будет:

$$du_x = -\frac{du_x}{dt} \cdot dx + \frac{du_x}{dy}\ ; dy + \frac{du_x}{dz}\ ;\ dz + \frac{du_x}{dt}\ ;\ dt\ . \tag{17}$$

Это выражение и аналогичные ему выражения для величин duy и duz можно внести в систему уравнений (17), которая после этого примет вид

$$\begin{cases} X - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial u_x}{\partial t} \cdot u_x + \frac{\partial u_x}{\partial y} \cdot u_y + \frac{\partial u_x}{\partial z} \cdot u_z + \frac{\partial u_x}{\partial t}, \\ X - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial u_x}{\partial t} \cdot u_x + \frac{\partial u_x}{\partial y} \cdot u_y + \frac{\partial u_x}{\partial z} \cdot u_z + \frac{\partial u_y}{\partial t}, \\ X - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial u_x}{\partial t} \cdot u_x + \frac{\partial u_x}{\partial y} \cdot u_y + \frac{\partial u_x}{\partial z} \cdot u_z + \frac{\partial u_z}{\partial t}. \end{cases} \tag{18}$$

$$\frac{\partial x}{\partial t} = u_x\ ;\ \frac{\partial x}{\partial t} = u_y\ ; \frac{\partial x}{\partial t} = u_z. \tag{19}$$

При установившемся течении из уравнений (3.65) выпадут слагаемые:

$$\frac{\partial x}{\partial t}\ ;\ \frac{\partial x}{\partial t}\ ; \frac{\partial x}{\partial t}. \tag{20}$$

4. Исследования процессов динамики и переноса загрязняющих веществ

Применим теорию импульсов исследования водного потока в трехмерной системе координат, учитывая нестационарность течения водного потока, действие внешних массовых сил и отказавшись от упрощений и предположений, запишем теорию импульсов для соответствующих направлений в декартовой системе координат, получим следующие уравнения:

$$\begin{aligned} &\rho \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial \Theta} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial C}{\partial y} + \omega\frac{\partial P}{\partial z}\right) + \frac{\partial P}{\partial x} = \\ &= \frac{\partial}{\partial z}\left\{\mu \cdot \left[2 \cdot \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial z}\right)\right]\right\} + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left[\mu \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial y}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial}\left[\mu \cdot \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z}\right)\right] + X \end{aligned} \tag{21}$$

где X - массовая сила, действующая в направлении оси X, Н/м3.

Аналогичные уравнения можно записать для других направлений y и z.

Установленная математическая зависимость позволяет определить отдельные параметры частиц водных растворов вертикальных установок при электрохимической коагуляции-флотации.

Дифференциальные уравнения, учитывающие движение частиц примесей водных растворов в пространственной системе координат, образуют следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} D_{n_x} \cdot \frac{d\tau_{D_x}}{dt} + \Delta_{1-1}(\tau_1^x - \tau_1) = \Delta \cdot C_D^x \cdot (a + \alpha_1 \cdot \tau_1) \\ D_{n_y} \cdot \frac{d\tau_{D_y}}{dt} + \Delta_{1-2}(\tau_1^y - \tau_2) = \Delta \cdot C_D^y \cdot (b + \alpha_2 \cdot \tau_2) \\ D_{n_z} \cdot \frac{d\tau_{D_z}}{dt} + \Delta_{1-3}(\tau_1^z - \tau_3) = \Delta \cdot C_D^z \cdot (c + \alpha_3 \cdot \tau_3) \end{cases} \tag{22}$$

где D_{n_x}, D_{n_y}, D_{n_z} - количество частиц эффективного диаметра, находящихся в пределах измеряемого диапазона (5…50 10-6 м), штук в одном из трех пространственных направлений;

τ_{D_x}, τ_{D_y}, $\tau_{D_з}$ - количественная смена частиц примесей водных растворов, величина которых (например, эффективный диаметр) изменяется от

времени протекания процесса обработки сточных вод, штук;

Δ_{1-1}, Δ_{1-2}, Δ_{1-3} - коэффициент нарастания эффективности обработки сточных вод пространственной системе координат, принимаемый в зависимости от конструктивного выполнения водоочистного оборудования (количество ступеней обработки, направления движения потоков на обработку);

τ_1^x, τ_1^y, τ_1^z - начальная концентрация примесей поступающих на обработку сточных вод, мг/л;

τ_1, τ_2, τ_3 - конечная концентрация примесей сточных вод, прошедших обработку, мг/л;

Δ – дельта-функция, учитывающая отдельную характеристику (параметр) частиц водного потока (в данном случае эффективен диаметр частиц примесей водных растворов);

C_D^x,C_D^y, C_D^z - концентрация загрязняющих веществ в пространственной системе координат x, y, z, мг/л;

u, v, w – составляющие скорости циркуляции водного потока по декартовым осям x, y, z;

a, d и b – коэффициенты, учитывающие количество значений одной группы (для значений эффективного диаметра одной или нескольких групп), принимается в пределах от 0 до 1.

Приведем систему уравнений к следующему виду:

$$\begin{cases} C_{D_x} \cdot \dfrac{d\tau_{D_x}}{dt} + (\Delta_{1-1} - \Delta C_D^1) \cdot \tau_1 - \Delta_{1-1} \cdot \tau_1 = \Delta C_D^1 \\ C_{D_y} \cdot \dfrac{d\tau_{D_y}}{dt} + (\Delta_{1-2} - \Delta C_D^2 \cdot \alpha_2) \cdot \tau_2 - \Delta_{1-2} \cdot \tau_2 = \Delta C_D^2 \\ C_{D_z} \cdot \dfrac{d\tau_{D_z}}{dt} - \Delta_{1-3} \cdot \tau_1^z - \Delta_{1-3} \cdot \tau_z + (\Delta_{1-1} + \Delta_{1-2} + \Delta_{1-3}) \cdot \tau_3 = \Delta C_D^3 \end{cases} \quad (23)$$

Уравнение (18) представляет собой систему неоднородных линейных дифференциальных уравнений. В соответствии с теоремой разложения, для получения общего решения неоднородной системы достаточно для ее частного решения добавить общее решение, соответствующее однородной системе:

$$\begin{cases} \tau_1 = \tau_{1X} + \tau_{1OX} \\ \tau_2 = \tau_{2Y} + \tau_{2OY} \\ \tau_3 = \tau_{3Z} + \tau_{3OZ} \end{cases} \quad (24)$$

где τ_{1X}, τ_{2Y}, τ_{3Z} - частные решения системы неоднородных линейных дифференциальных уравнений;

τ_{1OX}, τ_{2OY}, τ_{3OZ} - общие решения соответствующей системы однородных линейных дифференциальных уравнений.

Частичное решение системы (18) определяются при следующих условиях $t \to \infty$, когда имеет место бесконечная жидкая среда.

$$\begin{cases} (\Delta_{1-1} - \Delta C_D^1) \cdot \tau_1 - \Delta_{1-1} \cdot \tau_1) = \Delta C_D^1 \\ (\Delta_{1-2} - \Delta C_D^2 \cdot \alpha_2) \cdot \tau_2 - \Delta_{1-2} \cdot \tau_2 = \Delta C_D^2 \\ -\Delta_{1-3} \cdot \tau_1^z - \Delta_{1-3} \cdot \tau_3 + (\Delta_{1-1} + \Delta_{1-2} + \Delta_{1-3}) \cdot \tau_3 = \Delta C_D^3 \end{cases} \quad (25)$$

Основой исследования процессов динамики и переноса загрязняющих веществ, вблизи зоны выброса, открытого потока, используем следующее уравнение:

$$\frac{\partial \bar{\vartheta}_1}{\partial t} + D_1 \cdot \frac{\partial \bar{\vartheta}_1}{\partial x_1} + D_2 \cdot \frac{\partial \bar{\vartheta}_1}{\partial x_2} + D_3 \cdot \frac{\partial \bar{\vartheta}_1}{\partial x_3} = \frac{1}{\rho} \cdot D_1 \cdot \frac{d\bar{p}_{x_i}}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_2} \cdot \left(-\overline{\vartheta_1^! \cdot \vartheta_2^!}\right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \cdot \left(-\overline{\vartheta_1^! \cdot \vartheta_3^!}\right), \quad (26)$$

где $\bar{\vartheta}_i$, $\bar{\vartheta}_{i_внешн.}$ - соответственно компоненты осреднённой скорости водного потока в направлении оси x_i.

Изменение концентрации загрязняющих веществ, параметров и характеристик частиц водных растворов (сточных вод или других двухкомпонентных жидкостей) можно представить в виде трехмерного уравнения турбулентной диффузии, учитывающей физико-химическое взаимодействие загрязнений со сточными водами, наличие источника загрязнений и отдельных параметров (характеристик водных растворов:

$$\cdot\frac{\partial C}{\partial t}+u\cdot\frac{\partial C}{\partial x}+v\cdot\frac{\partial C}{\partial y}+\left(w+w_{C_B}+w_{C_Г}\right)\cdot\frac{\partial C}{\partial z}=$$
$$=\frac{\partial}{\partial z}K_C+\frac{\partial C}{\partial z}K_{CLV^2}C+Q\Delta(x-x^*)\Delta(y-y^*)\Delta(z-z^*)-\frac{C}{\tau_0}, \quad (27)$$

где C – концентрация загрязняющих веществ, мг/дм3; u, v, w – составляющие скорости циркуляции воды по декартовым осям x, y, z соответственно; w_{C_B}, $w_{C_Г}$ – соответственно гравитационная вертикальная скорость и горизонтальная загрязняющих веществ, м/с; τ0 – постоянное химическое разложение (разложения) загрязняющих веществ; K_C, $К_{CLV^2}$ – вертикальный и горизонтальный коэффициенты турбулентной диффузии, м2/с; Q – мощность (мощность) очистного оборудования, м3/с; Δ – дельта-функция, учитывающая отдельную характеристику (параметр) частиц водного потока (в данном случае рассматривается эффективный диаметр частиц примесей водных растворов); x*, y*, z* – координаты положения источника загрязнения в трехмерном пространстве.

При этом, необходимо различать случаи определения соответствующих гидродинамических параметров частиц примесей водных растворов, для которых проводятся исследования. В одном случае, это может быть один и тот же объем и определяемые гидродинамические параметры. Могут быть разными объемы, например, размеры частиц примесей водных растворов. В противном случае – разные объемы, в которых находятся одни и те же компоненты, которые определяются.

Полученное уравнение (27) позволяет оптимизировать обработку сточных вод с использованием реагентов, когда количество компонентов четыре и больше [14, 16]. При этом использование значительного количества реагентов, их введение в определённой последовательности и в определённом соотношении повышает уровень обработки сточных вод, создаёт условия для упорядочивании реагентного хозяйства систем водоснабжения, когда отсутствуют появление «пассивных» реагентов, т.е. химических компонентов, практически не влияющих на эффективность обработки сточных вод [15].

Заключение. Таким образом, движение водных потоков в замкнутом объёме аппаратов локального водоочистного оборудования, обусловлено условиями неразрывности водного потока и сохранением массы воды, водных растворов, зависящими от вертикальный и горизонтальный турбулентной диффузии, координаты положения источника загрязнения в трехмерном пространстве и гидродинамических параметров загрязняющих веществ.

ВЫВОДЫ:

1. Рациональное водопотребление непосредственно определяется направлениями движения водных потоков, основными условиями которых являются неразрывность водного потока, сохранения массы вещества

2. Основой исследования процессов динамики и переноса загрязняющих веществ, вблизи зоны выброса открытого потока, определяющие компоненты осреднённой скорости водного потока в пространственной системе координат.

3. Для условий формирования водного потока элементарного объёма, в форме параллелепипеда круглого поперечного сечения с гранями, необходимо учитывать движение водного потока по восходящих/нисходящих направлениям, что позволяет оптимизировать работу водоочистного оборудования и уменьшить гидравлические сопротивления.

4. В случае, когда изменение концентрации загрязняющих веществ, параметров и характеристик частиц водных растворов, в виде трёхмерного уравнения турбулентной диффузии, необходимо учитывать концентрацию загрязнения, входящих потоков сточных вод.

5. С использованием теории импульсов исследован процесс динамики и переноса загрязняющих веществ, установленная математическая зависимость позволяет определить отдельные параметры частиц водных растворов вертикальных установок при электрохимической коагуляции-флотации.

6. Установлено, что изменение концентрации загрязняющих веществ, параметров и характеристик частиц водных растворов (сточных вод или других двухкомпонентных жидкостей) можно представить в виде трехмерного уравнения турбулентной диффузии, учитывающей физико-химическое взаимодействие загрязнений со сточными водами, наличие источника загрязнений и отдельных параметров (характеристик водных растворов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка и внедрение ресурсосберегающих технологий утилизации отходов сточных вод производств защитных покрытий и печатных плат :

монография /Е.А. Урецкий, И.В. Николенко, В.В. Мороз. – Москва : РУСАЙНС, 2022. – 172 с.

2. Урецкий Е.А. Оптимизация существующих и разработка новых ресурсосберегающих технологий в водном хозяйстве предприятий приборо- и машиностроения : Монография. – Брест. Изд-во Бр ГТУ, 2019. – 299 с.

3. Технология очистки природных вод [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие / Ж.М. Говорова ; Министерство науки и высшего образования Российской федерации, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, кафедра водоснабжения и водоотведения. Электрон. дан. и прог. (0,7 Мб).- Москва издательство МИСИ — МГСУ, 2023. - Режим доступа: http://lib.mgsu.ru - Загл. с титул. Экрана.

4. Организация эксплуатации систем и сооружений водоснабжения и водоотведения [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие для обучающихся направлению подготовки 08.03.01 Строительство / С.Е. Алексеев, О.Г. Примин ; Министерство науки и высшего образования Российской федерации, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, кафедра водоснабжения и водоотведения. Электрон. дан. и прог. (3,3 Мб).- Москва издательство МИСИ — МГСУ, 2023. 60 с. - Режим доступа: http://lib.mgsu.ru - Загл. с титул. Экрана.

5. Надежность систем водоснабжения и водоотведения: учебно-методическое пособие [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие для обучающихся направлению подготовки 08.03.01 Строительство / О.Г. Примин). - Москва издательство МИСИ — МГСУ, 2021. 68 с. - Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/262274 - Загл. с титул. Экрана.

6. Роди, В. Модели турбулентности окружающей среды / Под. ред. В. Кольмана // Методы расчёта турбулентных течений. – М.: Мир, 1984. – С. 227-322.

7. Основы прогнозирования качества поверхностных вод / Л.Н. Фальковская, Л.Л. Пааль, И.Ф. Грибовская. – М.: Наука, 1982. – 179 с.

8. Влияние конструктивных параметров аэраторов на распределение воздуха в аэрационных системах / Ю.Г. Марченко, Ю.М. Мешенгиссер // Водоснабжение и санитарная техника, 2003. №3. - С. 34 -36.

9. Петров Г.А. Гидравлика переменной массы. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1964.

10. Быстров П.И., Михайлов В.С. Гидродинамика коллекторных теплообменных аппаратов . – М.: Энергоиздат. – 1982 г.

11. Орел А.Н. и др. Гидроаэромеханика и её использование в энергетике АПК. Учебное пособие для сельскохозяйственных вузов / А.Н. Орел и др. – М.: МГАУ, 2008. – 395 с.

12. Методы инновационного обеспечения экологической безопасности промышленных сточных вод / С.И. Мовчан, А.А. Дерусов // Безопасность и ресурсосбережение в техносфере : сборник материалов IV Международной научно-практической конференции (29 апреля 2024 г. – 31 октября 2024 г.) / ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет». – Краснодар: Изд. ФГБОУ ВО «Куб ГТУ», 2024. – 296 с. С. 212-218.

13. Снижение риска безопасности технологических процессов локального водоочистного оборудования / С.И. Мовчан, И.Н. Мохнатко // Безопасность и ресурсосбережение в техносфере: сборник материалов IV Международной научно-практической конференции (29 апреля 2024 г. – 31 октября 2024 г.) / ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет». – Краснодар: Изд. ФГБОУ ВО «Куб ГТУ», 2024. – 296 с. С. 219-224.

14. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024626250 Ru. База данных количественного состава и оптимального соотношения химических компонентов отработанного моющего раствора (четыре компонента) к шестивалентному хрому / Мовчан С.И. // Дата регистрации 20.12.2024. Номер заявки 2025625831. Дата поступления 03.12.2024. Дата публикации 20.12.2024. Бюл. № 12.

15. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025621623 Ru. База данных показателей эффективности очистки от ионов тяжелых металлов высококонцентрированных сточных вод гальванического производства / Мовчан С.И. // Дата регистрации 14.04.2025. Номер заявки 2024625990. Дата поступления 11.12.2024. Дата публикации 14.04.2025. Бюл. № 4.

16. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025621805 Ru. База данных количественного состава и оптимального соотношения химических компонентов отработанного моющего раствора (четыре компонента) на основе синтетических моющих средств, к шестивалентному хрому / Мовчан С.И. // Дата регистрации 22.04.2025. Номер заявки 2025620008. Дата поступления 09.01.2025. Дата публикации 22.04.2025. Бюл. № 5.

17. Мовчан, С.И. Моделирование в аппаратах обработки сточных вод локального водоочистного оборудования систем оборотного водоснабжения (в порядке обсуждения) / Николенко, И.В. // Строительство и техногенная безопасность. Научно-технический журнал по строительству и архитектуре. – 2025. - № 38(90). - С. 77-84.

18. Мовчан, С.И. Совершенствование технологии обработки сточных вод, образующихся на ремонтных предприятиях / С.И. Мовчан // Строительство и техногенная безопасность. Научно-технический журнал по строительству и архитектуре. – 2026. - № 41(93). - С. 81-88.

REFERENCES

1. Development and implementation of resource-saving technologies for the disposal of wastewater from the production of protective coatings and printed circuit boards: monograph / E.A. Uretsky, I.V. Nikolenko, V.V. Moroz. - Moscow: RUSAINS, 2022. - 172 p.
2. Uretsky E.A. Optimization of existing and development of new resource-saving technologies in water management of instrument-making and mechanical engineering enterprises: Monograph. - Brest. Publishing house of Br GTU, 2019. - 299 p.
3. Natural water purification technology [Electronic resource]: a teaching aid / Zh.M. Govorova; Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Department of Water Supply and Sanitation. Electronic data and prog. (0.7 MB). - Moscow, MISI-MGSU Publishing House, 2023. - Access mode: http://lib.mgsu.ru - Title with title. Screen.
4. Organization of operation of water supply and sanitation systems and structures [Electronic resource]: a teaching aid for students in the field of training 08.03.01 Construction / S.E. Alekseev, O.G. Primin; Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Department of Water Supply and Sanitation. Electronic data and software (3.3 MB). - Moscow, MISI-MGSU Publishing House, 2023. 60 p. - Access mode: http://lib.mgsu.ru - Title with title. Screen.
5. Reliability of Water Supply and Sanitation Systems: A Study Guide [Electronic resource]: A study guide for students majoring in 08.03.01 Construction / O.G. Primin). - Moscow, MISI-MGSU Publishing House, 2021. 68 p. - Access mode: https://e.lanbook.com/book/262274 - Title with Screen Title.
6. Rodi, V. Models of Environmental Turbulence / Ed. V. Kolman // Methods for Calculating Turbulent Flows. - Moscow: Mir, 1984. - pp. 227-322.
7. Fundamentals of Forecasting Surface Water Quality / L.N. Falkovskaya, L.L. Paal, I.F. Gribovskaya. - Moscow: Nauka, 1982. - 179 p.
8. The Influence of Aerator Design Parameters on Air Distribution in Aeration Systems / Yu. G. Marchenko, Yu. M. Meshengisser // Water Supply and Sanitary Engineering, 2003. No. 3. - Pp. 34-36.
9. Petrov G. A. Variable Mass Hydraulics. - Kharkov: Kharkiv State University Publishing House, 1964.
10. Bystrov P. I., Mikhailov V. S. Hydrodynamics of Collector Heat Exchangers. - Moscow: Energoizdat. - 1982.
11. Orel A. N. et al. Hydroaeromechanics and its use in the power industry of the agro-industrial complex. Textbook for agricultural universities / A. N. Orel et al. - Moscow: Moscow State Agrarian University, 2008. - 395 p.
12. Methods of innovative provision of environmental safety of industrial wastewater / S.I. Movchan, A.A. Derusov // Safety and resource conservation in the technosphere: collection of materials of the IV International scientific and practical conference (April 29, 2024 – October 31, 2024) / Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Kuban State Technological University”. - Krasnodar: Publ. FGBOU VO “Kub STU”, 2024. - 296 p. Pp. 212-218.
13. Reducing the safety risk of technological processes of local water treatment equipment / S.I. Movchan, I.N. Mokhnatko // Safety and resource conservation in the technosphere: collection of materials of the IV International scientific and practical conference (April 29, 2024 – October 31, 2024) / Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Kuban State Technological University”. – Krasnodar: Publ. FGBOU VO "Kub STU", 2024. – 296 p. Pp. 219-224.
14. Certificate of state registration of database No. 2024626250 Ru. Database of quantitative composition and optimal ratio of chemical components of spent cleaning solution (four components) to hexavalent chromium / Movchan S.I. // Date of registration 20.12.2024. Application number 2025625831. Date of receipt 03.12.2024. Date of publication 20.12.2024. Bulletin No. 12.
15. Certificate of state registration of database No. 2025621623 Ru. Database of performance indicators for removing heavy metal ions from highly concentrated wastewater from galvanic production / Movchan S.I. // Date of registration 14.04.2025. Application number 2024625990. Date of receipt 11.12.2024. Date of publication 14.04.2025. Bulletin No. 4.
16. Certificate of state registration of the database No. 2025621805 Ru. Database of the quantitative composition and optimal ratio of chemical components of the spent cleaning solution (four components) based on synthetic detergents, to hexavalent chromium / Movchan S.I. // Date of registration 22.04.2025. Application number 2025620008. Date of receipt 09.01.2025. Date of publication 22.04.2025. Bulletin No. 5.
17. Movchan, S.I. Modeling in wastewater treatment units of local water treatment equipment of water recycling systems (for discussion) / Nikolenko, I.V. // Construction and technological safety. Scientific and technical journal on construction and architecture. - 2025. - No. 38 (90). - P. 77-84. K2.
18. Movchan, S.I. Improving the technology for treating wastewater generated at repair facilities / S.I. Movchan // Construction and technological safety

MODELING IN WASTEWATER TREATMENT APPARATUS LOCAL WATER TREATMENT EQUIPMENTRECYCLING WATER SUPPLY SYSTEMS (for discussion)

Movchan[1] S.I., Nikolenko[2] I.V.

[1]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Melitopol State University"
Address: Zaporozhye region, Melitopol, B. Khmelnitsky Ave., 18
e-mail: msi.movchan@gmail.com

[2]FGAOU VO "V.I. Vernadsky Crimean Federal University",
Institute "Academy of Construction and Architecture",
295493, Republic of Crimea, Simferopol, Kyiv Street, 181.
E-mail: nikoshi@mail.ru

Abstract. This paper examines the movement of water flows in ascending and descending directions within circular apparatuses, enabling optimization of wastewater treatment processes, reduction of hydraulic load, reduction of hydraulic resistance, and optimization of water treatment equipment operation. Using well-known laws of conservation of momentum, differential equations describing the movement of water flows are used in the limited volumes of water treatment equipment.
Using the analogy of water flow movement, the authors consider a method for calculating an aeration system, enabling the optimal solution for each specific case to be determined, depending on the design parameters, their number, and the diameter of the equipment, which determines the equipment's efficiency.
Taking into account theoretical conditions, the use of differential conditions for the continuity of water flow and the equation of motion of an ideal fluid (Euler's equations) is justified, forming the basis for studying the dynamics and transport of pollutants.
Subject: Local water treatment equipment with moving water flows is regulated by differential continuity equations and the Bernoulli equation, which consider the movement of water flows from an elementary trickle to a real fluid flow.
Materials and Methods: To evaluate the characteristics of countercurrent flow, conditions in a pressure system were considered where the water flow is limited by the dimensions of the equipment used to treat wastewater in industrial wastewater treatment systems. The movement of water flows is determined by various chambers (stages), which directly determine the efficiency of wastewater treatment.
Results: System modeling allows for the allocation of a specific volume of liquid within the local water treatment equipment to optimize the volume of wastewater and associated water resources.
Key findings: Taking into account well-known continuity equations and the Bernoulli equation, optimal operating conditions for water treatment equipment were determined, enabling process optimization, reduction of hydraulic loads, and improvement of industrial wastewater treatment.

Key words: water treatment, circulating systems, water flow, devices, local equipment, elementary volume, liquid mass, volume of water resources.

The work was carried out within the framework of the State Order for the provision of public services (execution of work) No. 075-00656-26-04 dated 05/20/2026 "Water treatment to ensure the required quality of water from groundwater sources used for irrigation of agricultural products and garden products in the southern regions" (FRRS 2026-0015)"