

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ ПРИМЕСЕЙ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ

Степан Эпоян¹, Сергей Мовчан²

¹Харьковский национальный университет строительства и архитектуры
Адрес: 61002, г. Харьков, ул. Сумская, 40.
E-mail: vkg.knuca@ukr.net.

²Таврический государственный агротехнологический университет
Адрес: 72310 г. Мелитополь, Запорожской обл., пр. Б. Хмельницкого, 18
E-mail: movchantsaa@rambler.ru

Аннотация. С использованием уравнений неразрывности потока, траектории движения частиц и уравнения материального баланса в статье представлена численная модель движения частиц примесей в водных растворах, на основании которой разработаны и усовершенствованы оптические схемы для определения их гидромеханических параметров и характеристик.

Ключевые слова: системы оборотного водоснабжения, математическое моделирование, численная модель, траектория движения частицы, уравнение неразрывности потока, уравнение материального баланса, частицы примесей водных растворов, гидромеханические параметры, эффективный диаметр, электрокинетический дзета-потенциал

ВВЕДЕНИЕ

Системы оборотного водоснабжения промышленных предприятий являются составной частью водохозяйственного комплекса страны. Многообразие образующихся сточных вод, объём стоков и многокомпонентность различных загрязнений ставит перед производителями не только технические задачи их обработки, нейтрализации, извлечения ценных компонентов, но и экономические. Последнее обстоятельство является определяющим для проектирования и эксплуатации систем промышленного водоснабжения. Одним из путей управления и контроля технологическими операциями в системах промышленного водоснабжения является исследование процессов движения частиц примесей, находящихся в водных растворах. А также разработке новых и модернизации существующих оптико-механических систем контроля и управления этими процессами в системах замкнутого водоснабжения.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В современных условиях эксплуатация систем промышленного водоснабжения играет важную роль для водохозяйственного комплекса страны. Ухудшающееся экологическое состояние водных объектов и постоянная нагрузка на них ставит перед водохозяйственным комплексом страны задачу поиска и выбора рациональных и эффективных способов контроля и управления отдельными системами промышленного водоснабжения.

Объёмы образующихся сточных вод, их состав и разнообразие загрязнений, которые сбрасываются в водные объекты неочищенными или недостаточно очищенными, ставят перед промышленным сектором страны, использующим водные ресурсы, ряд научно-прикладных задач.

Одним из путей решения научно-прикладных задач исследования процесса движения частиц примесей в водных растворах является комплексный подход к работе систем промышленного водоснабжения, в которых решаются задачи повышения интенсификации отдельных составляющих и элементов систем оборотного водоснабжения. Комплексный подход состоит в рассмотрении взаимосвязи между основны-

ми элементами и составляющими систем промышленного водоснабжения: обработке сточных вод, определении качества очистки стоков и утилизации жидких отходов промышленного производства.

АКТУАЛЬНОСТЬ

РАССМАТРИВАЕМОЙ ТЕМЫ

Основой этого решения научно-прикладных задач является установление математических зависимостей с помощью численных методов, аналитических зависимостей и полученных результатов математических расчётов, которые определяют техническое и технико-экономическое состояние всех систем промышленного водоснабжения.

Кроме этого, математические зависимости позволяют моделировать процессы, обуславливающие работу систем оборотного водоснабжения на всех этапах работы водоочистного оборудования.

С целью интенсификации отдельных процессов и составных элементов в работе систем промышленного водоснабжения важного значения приобретают методы контроля гидромеханических параметров частиц примесей водных растворов.

В практике технологического контроля процессов очистки принято различать химико-бактериологический контроль, который непосредственно обеспечивает требуемое качество воды, и технологический контроль за работой очистных сооружений и ходом протекания в них процессов. В общий объём технологического контроля входит определение как количественных параметров (расход воды и реагентов, уровня жидкости, давления), так и качественных (величина pH, электрическая проводимость, щёлочность, уровень солей жёсткости и др.). Некоторые параметры подвергаются обоим методам контроля, например, остаточный хлор, мутность, содержание хлоридов и др. [25].

Количественный фотометрический анализ (спектрография и фотоколориметрия) является развивающимся методом. Характерными тенденциями его развития являются: 1) применение математических методов обработки результатов; 2) использование методов линейного и выпуклого программирования, а также

нелинейного метода наименьших квадратов; 3) использование программированных схем и ЭВМ [5].

Однако рассматриваемые способы и методы контроля не в полной мере решают задачи, связанные с оперативным контролем качества обработки сточных вод, определения отдельных параметров и характеристик частиц примесей водных растворов.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Количественный спектрофотометрический фотоколориметрический анализ раствора поглощающего вещества сводится к определению концентрации этого вещества в растворе по измеренным с помощью спектрофотометра или электрофотоколориметра оптическим плотностям испытуемого раствора или раствора стандарта с известной концентрацией или выбранной длине волны [5].

Современные лабораторные автоматизированные анализаторы (автоанализаторы) можно подразделять на одно- и многокомпонентные. К разряду однокомпонентных целесообразно отнести комплексные лабораторные автоматические анализаторы, позволяющие в одной серии исследований (без перенастройки и переоборудования дополнительными элементами) анализировать только один из компонентов поступающих проб. К многокомпонентным относятся аппараты, выполняющие в каждой серии анализ более чем одного компонента [24]. Такие аппараты и оборудование создают условия для эффективного определения параметров сточных вод, расширяют круг решаемых задач в системах промышленного водоснабжения, обеспечивая экологическую безопасность водных объектов в части контроля и управления процессами водообработки.

Согласно поставленным задач и выбранного направления исследований предполагается проводить с использованием лабораторного оборудования на основе лазерной доплеровской интерферометрии. Приборное оборудование использует простые конструктивные решения на основе эффекта Доплера и призмы Дове.

В способе измерения эффективного диаметра и концентрации частиц в растворе используется эталонный раствор. Вначале измеряют количество импульсов доплеровского сигнала за единицу времени для эталонного раствора. Затем определяют соответствующее количество импульсов для исследуемого раствора и вычисляют эффективный диаметр и концентрацию частиц в растворе [11].

Устройство для измерения скорости частиц примесей в жидкости, в которой используется светоделитель и зеркало, установлено с возможностью перемещения вдоль оптической оси, а выход фотоприёмника электрически связан с аналого-цифровым преобразователем. Разработанная оптическая схема может быть автоматизирована с добавлением в схему устройств оперативного контроля [12].

В способе измерения скорости частицы в растворе при электрофорезе используются параллельно установленные и работающие совместно два измерительных блока. Такое расположение основных и до-

полнительных устройств и приборов позволяет одновременно измерять, контролировать и сравнивать скорость движения отдельной частицы водного раствора в процессе электрофореза [13].

Способ контроля качества очистки сточных вод устанавливается на действующей системе водоснабжения. При этом часть водного раствора отводится для измерений в дополнительную ячейку, установленную параллельно движению основного потока сточных вод. Такое техническое исполнение способствует измерению параметров частиц водных потоков в режиме реального времени, без остановки основного технологического процесса [14].

В предлагаемом техническом решении используют призму Дове, с помощью которой измеряют частоту доплеровского сигнала и определяют горизонтальную составляющую скорости движения частицы. Поворачивая призму Дове на 90° , измеряют частоту доплеровского сигнала и определяют её вертикальную составляющую скорости движения частицы [15].

В способе измерения количества частиц водных растворов и сравнения качества очистки сточных вод используется эталонный и буферный растворы, позволяющие сравнивать полученные результаты измерений гидромеханических параметров частиц водных растворов. Полученные результаты непрерывно обрабатываются в режиме реального времени с одновременным контролем качества обработки сточных вод [16].

Устройство для определения количества частиц примесей в воде используется на действующей системе централизованного водоснабжения. Измерительная камера располагается на напорном дополнительном трубопроводе, присоединенном к основной системе водоснабжения [17].

В способе освещения электрофоретической ячейки водной среды с использованием составляющих оптической системы, электромеханического модулятора, системы зеркал гелий-неонового излучателя создают систему интерференциальных полос для определения параметров частиц водных растворов. Особенностью предлагаемой схемы является использование в оптической схеме двух источников излучения при освещении частицы в электрофоретической ячейке [18].

В системе двойного контроля параметров частиц водных растворов используется призма Дове, с помощью которой зондируемую зону освещают источником света, расположенном перпендикулярно к когерентному излучению. Полученная информация направляется на фоторезистор, передаётся на блок преобразования сигнала и через исполнительный механизм сигнал приходит на механизм блока дозирования [19].

В способе экспрессного анализа определения параметров частиц водных растворов используется источник когерентного излучения, составной светоделитель, электромеханический модулятор, электрофоретическая камера. В оптической схеме дополнительно установлена камера с эталонным раствором, блок вычислений, демодулятор сигнала, усилитель сигнала и аналого-цифровой преобразователь, повышающие точность производимых измерений, созда-

ющие условия для автоматизации процесса измерения и определения искомых параметров частиц водных растворов [20].

Устройство измерения гидромеханических параметров частиц, находящихся в водных растворах, использует в оптической схеме два источника излучения и два электромеханических модулятора на четыре измерительных канала, которые в режиме реального времени через электромеханический модулятор с прорезями и систему зеркал освещают частицу, находящуюся в электрофоретической камере [21].

При определении расположения частицы в жидкой среде используются модулятор добротности, короткофокусный и длиннофокусные объективы и др. оборудование, позволяющие точно определять расположение частиц в сточных водах и аналогичных водных растворах [22].

Для проведения исследований жидких сред, технологического контроля их параметров и по характеру основного эффекта, используемого в анализаторах, все приборы можно разделить на следующие группы: механические анализаторы (определяют гидравлические, расходные и др. характеристики), тепловые анализаторы (тепловые и связанные с ними объёмные параметры), оптические анализаторы, радиоспектрметрические (различные по природе видов резонанса), электрохимические (изменение ЭДС и других электрических характеристик) и радиоизотопные (поглощающая и рассеивающая способности) [1].

Для исследования первой и второй группы примесей с размером частиц (диаметра) от 10^{-3} до 10^{-8} мм [7], на рис. 1 представлена условная классификация разработанных оптических методов определения гидромеханических параметров частиц водных растворов.

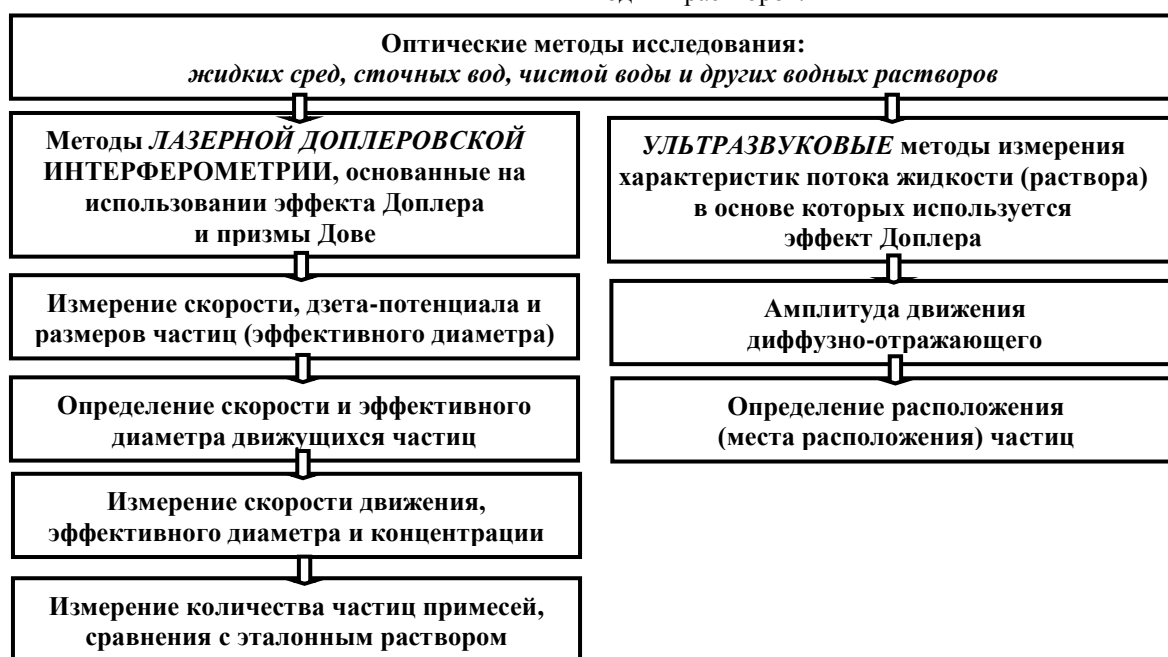


Рис. 1. Классификация оптических методов исследования и контроля жидкой среды, сточных вод и других водных растворов

Fig. 1. Classification of the optical ways of the investigation and controlling of the liquid medium, wastewater and other aqueous solutions

Оптические свойства жидких сред, используемых при лабораторном анализе, характеризуются следующими свойствами: зеркальное отражение, рассеянное отражение, пропускание рассеянное и преломление, квантовый метод люминесценции, длина волны максимального поглощения и излучения, спектральная характеристика поглощения или излучения, вращение плоскости поляризации света, спектральная зависимость вращения плоскости поляризации света и круговой дихроизм [1].

С учётом условной классификации основных групп анализаторов, используемых при лабораторном анализе жидких сред и дифференцированных по принципу действия, [1] можно сделать следующие выводы.

Во-первых, оптические анализаторы [4] относятся к наиболее перспективным приборам, среди которых выделяются спектральные анализаторы [1, 4], в

которых значение выходного сигнала зависит от взаимодействия с исследуемой жидкостью или от свойств излучения анализируемой среды. А также монохроматические и немонохроматические анализаторы в зависимости от ширины используемой области излучения (близкой к нулю или имеющей существенную ширину [1, 23].

Во-вторых, при разработке технологических приёмов, способов и методов необходимо использовать многокомпонентность и многовариантность лабораторного оборудования исследования примесей водных растворов в чистой воде. Чтобы предлагаемые технические решения в полном объёме выполняли поставленные задачи по определению искомых параметров и характеристик.

И, наконец, предлагаемые технические решения по своей технической сущности должны соответствовать современным требованиям, которые состоят в

надёжности и мобильности, эффективности и точности измерений, а также координироваться с предлагаемыми техническими условиями современных средств автоматизации (аналогово-цифровой преобразователь, персональная вычислительная машина и т.п.)

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью исследования процесса движения частиц примесей в водных растворах является усовершенствование численной модели для определения гидромеханических параметров частиц примесей водных растворов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Обосновать выбор основных математических зависимостей и определение движущей силы процессов, происходящих в системах оборотного водоснабжения.

2. Выбрать параметры и граничные условия движения частиц примесей водных растворов в системах оборотного водоснабжения.

3. Установить взаимосвязь между параметрами частиц водных растворов, определяемых с помощью математических зависимостей и определяемых опытным (экспериментальным) путём.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

В работах [11-21] уделено основное внимание ключевому процессу, происходящему в системах промышленного водоснабжения, а именно – контролю параметров частиц примесей водных растворов.

Основой для разработки оптических схем, модернизации и усовершенствования уже существующих оптико-механических систем является классификация примесей по их фазово-дисперсному состоянию (рис. 2), разработанная Л.А. Кульским [4].

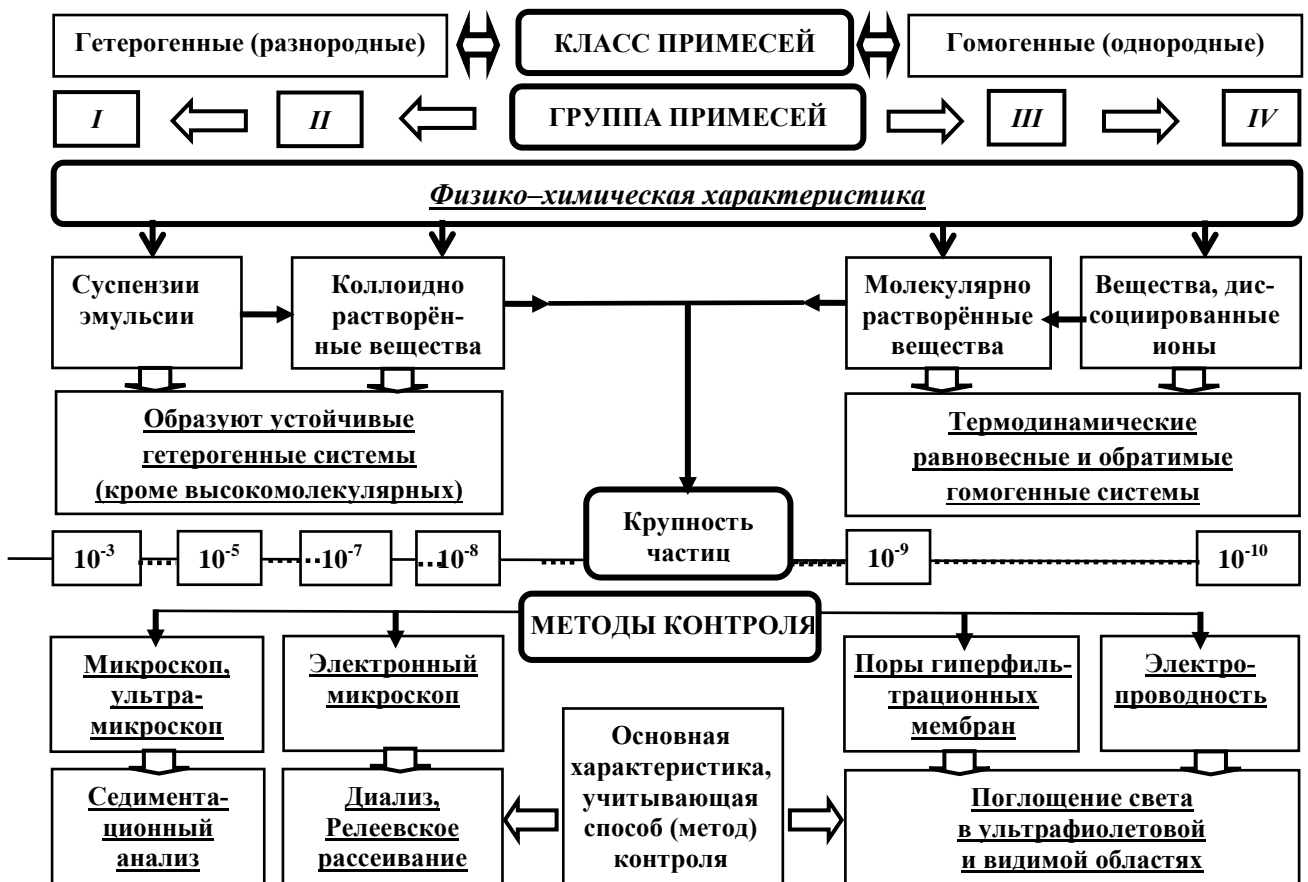


Рис. 2. Состав примесей, их характеристика и методы контроля согласно классификации Л.А. Кульского

Fig. 2. The composition of the impurities, their description and control methods according to the classification by L.A. Kul'skiy

Согласно классификации Л.А. Кульского гетерогенные (разнородные) системы принадлежат к I и II группе примесей. По своим физико-химическим характеристикам сточные образуют суспензии, эмульсии и коллоидно-растворённые вещества, характеризуются размерностью частиц, находящихся в одном порядке (10⁻³...10⁻⁸), что в значительной степени упрощает задачу определения их основных параметров и характеристик.

Эти методы, способы и технические решения должны учитывать:

- кинетическую неустойчивость водных систем и образующихся соединений;
- подвижность отдельных частиц в электрическом поле;
- взаимодействие со световыми лучами и др.

Математическая модель основывается на допущениях и предположениях, которые не вносят существенных погрешностей при выполнении расчётов. Основой математического моделирования являются аналитические зависимости:

- уравнение неразрывности потока:

$$Q = \omega \cdot v, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + a \cdot \frac{\partial v}{\partial r} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\text{Re}} \cdot \left(\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} \right), \quad (2)$$

- уравнение траектории движения частицы:

$$\frac{\partial z}{v \pm u_w} = \frac{\partial z}{u + u_w \cdot \frac{\omega^2 \cdot r}{g}}, \quad (3)$$

где u_w - гидравлическая крупность, м/с;

- уравнения переноса количества движения:

$$\frac{u}{\tau} + \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

где r, Z - продольная и радиальная координаты, м; v, u - продольная и радиальная составляющая скорости, м/с;

- уравнение материального и энергетического балансов:

$$\sum G_i = 0, \quad \sum G_n = \sum G_k + \sum G_b, \quad (5)$$

$$\sum Q_i = 0, \quad \sum Q_n = \sum Q_k + \sum Q_b, \quad (6)$$

где $\sum G_i, \sum Q_i$ - общая масса и энергии веществ, которые происходят в соответствующих процессах; $\sum G_n, \sum Q_n$ - масса веществ и энергии во входных потоках соответствующих процессов; $\sum G_k, \sum Q_k$ - масса вещества и энергии в выходных потоках соответствующих процессов; $\sum G_b, \sum Q_b$ - масса и энергии необратимых потерь веществ соответствующих процессов.

Общий вид уравнений материального (5) и энергетического (6) балансов может быть использован или для процесса в целом, или для любой его стадии. Так же, из условия необходимости потребностей расчета, составляют уравнение материального и энергетического балансов для всего аппарата или для его части.

Обработка параметров частиц водных растворов при интенсификации работы оборотных систем водоснабжения рассматриваются в работе [10]. В работе обоснован выбор оптической схемы для определения гидромеханических параметров частиц водных растворов. Наведен алгоритм расчёта величины эффективного диаметра и определения погрешности проводимых измерений в пределах изменения угла между зондируемыми пучками, электрофоретической скорости движения частицы и времени нарастания амплитуды доплеровского сигнала.

Установлено, что распространения загрязнений, их количество и общая масса в водных растворах происходят в неоднородной структуре водного раствора (ионы тяжелых металлов, взвешенные вещества, масла, нефтепродукты и т.п.). «Поведение» загрязняющих веществ зависит от следующих факторов:

- химических (соединения с другими веществами, реакции, нейтрализация, воздействия реагентов, выпадение в осадок и т.п.);
- физических (коагуляция, флотация, седиментация, переход из одного агрегатного состояния в другое и т.п.);
- физико-химических процессов обработки;
- термо- и гидродинамических (перенос, рассеяние, растворение и т.п.).

Для аппаратов промежуточного типа структура потока наиболее часто описывается ячейковой или диффузной моделями.

Ячейковая модель рассматривает аппарат условно как серию последовательно соединенных **ячей** одинакового размера, общий объем которых равняется объему аппарата с идеальным перемешиванием в каждой **ячейке**. Тогда функция распределения индикатора имеет вид:

$$C = \frac{n^n}{(n-1)!} \Theta^{n-1} e^{-n\Theta}, \quad (7)$$

где n - количество **ячеек**, на которые условно разделяется аппарат.

Диффузная модель выходит из условия приближенной аналогии между перемешиванием и диффузией путем введения фиктивного коэффициента диффузии E , которая имеет также название коэффициента продольного перемешивания. Единственным параметром диффузной модели есть критерий Пекле:

$$P_e = \frac{\omega l}{E}, \quad (8)$$

а функция отклика имеет вид:

$$C = \sqrt{\frac{P_e}{4 \cdot \pi \cdot \theta}} \cdot e^{-\frac{P_e \cdot (\theta-1)^2}{\theta}}. \quad (9)$$

Выбор типа модели (ячейковая или диффузная) зависит от исследователя, поскольку они во многом равноценные.

Кривые отклика на импульсный ввод трассер (рис. 3) строились в безразмерных координатах согласно [20] по формулам, учитывающим:

- безразмерное время

$$\Theta = \frac{\tau}{\tau}. \quad (10)$$

- безразмерную концентрацию

$$C(\Theta) = \frac{c \cdot \tau}{\sum C_i \cdot \Delta \tau}, \quad (11)$$

где τ - время измерения концентрации трассера, мин; $\tau = \frac{\sum \tau_i \cdot C_i}{\sum C_i}$ - среднее время пребывания во флота-

ционной камере, мин; $C = \frac{pH_0 - pH_t}{pH_0}$ - концентрация

трассера на входе из флотокамеры; $\Delta \tau$ - интервал времени отбора проб.

Критерий Пекле определяется по уравнению:

$$P_e = \frac{U \cdot L}{D_L} = \frac{2 \cdot \tau^2}{S_z \cdot \tau^2}. \quad (12)$$

Исследования показали, что в диапазоне изменения гидравлической нагрузки - 2-3 м³/м² час, P_e изменяется незначительно и коэффициент D_L составляет 0,67-0,75.

Это соответствует промежуточной модели между идеальным вытеснением и идеальным смешиванием.

Представленные зависимости безразмерной концентрации $C(\Theta)$ от безразмерного времени Θ позволяют сопоставить их с кривыми отклика аппарата идеального смешивания в условиях импульсной подачи трассера (рис. 3).

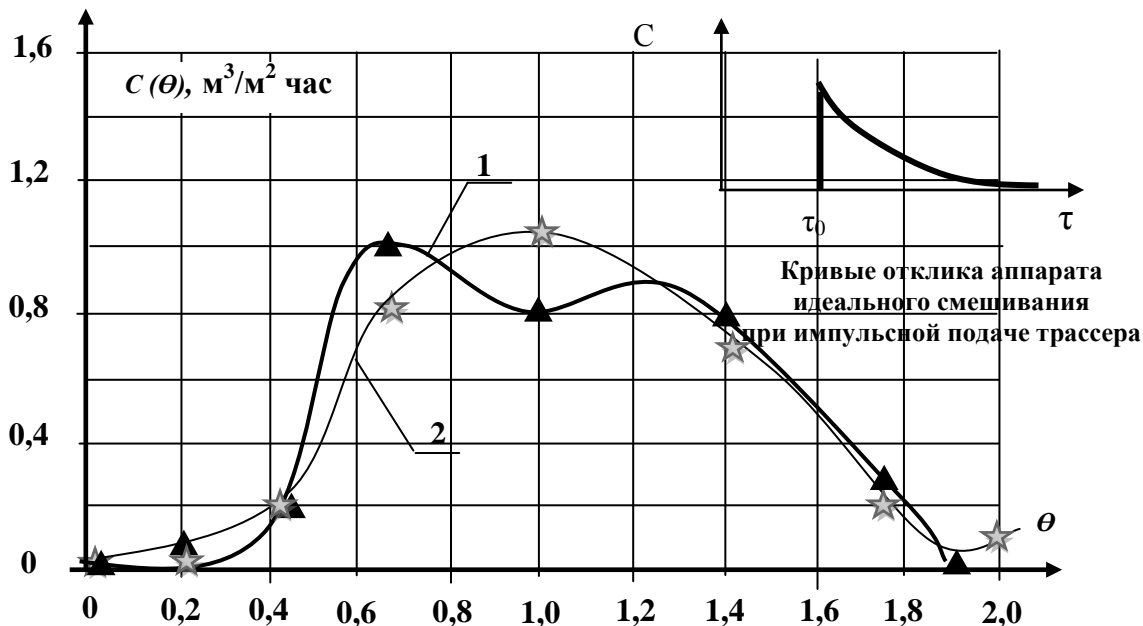


Рис. 3. Кривые распределения при импульсном вводе трассера с гидравлической нагрузкой $\text{м}^3/\text{м}^2$ час: 1 – 3,0; 2 – 2,0

Fig. 3. The distribution curves along impulse input of the tracer with hydraulic loading $\text{м}^3/\text{м}^2$ per hour: 1 – 3,0; 2 – 2,0

Камера реакции водоочистного оборудования входит в нижнюю часть флотокамеры и создаёт условия для сосредоточенного впуска газонасыщенной жидкости, что создаёт диффузную модель, наиболее часто встречающуюся в практике очистки стоков.

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

Размеры переходной зоны, составляющие общую высоту активной части вертикальной флотокамеры H_D , сформированной за время t после начала поступления загрязнений в водный поток, определяются по формуле (13):

$$H_D = \alpha \cdot \sqrt{\frac{D \cdot t}{n}}, \quad (13)$$

где D - коэффициент диффузии;
 n - активная плотность (пористость) водного раствора;

α - числовой коэффициент, зависящий от концентрации загрязнителя.

По результатам лабораторных исследований эффект диффузии наиболее сильно проявляется в небольших объёмах водных растворов, когда высота шаров жидкости не превышает 1,0-2,0 метра. Влияние диффузии (диффузионных процессов) усиливается для жидкостей (водных растворов, технических жидкостей и т.п.) с уменьшением плотности и увеличением коэффициента диффузии и становится менее заметным с увеличением объёмов жидких растворов и увеличением скорости водного потока.

Диффузия (процессы диффузии) зависят от скорости движения частиц водных потоков – от её вертикальной и горизонтальной составляющих. Вследствие того, что вертикальная составляющая больше горизонтальной, это соответствует условию, когда вертикальная дисперсия больше горизонтальной дисперсии. В самом общем случае, дисперсия представляет совокупное действие механической

дисперсии (конвективной диффузии), являющейся следствием неодинаковых (по величине) значений скоростей и молекулярной диффузии, возникающей вследствие переноса вещества за счёт градиента концентрации и определяемой законом Фика [21, 22].

$$Q = -D_M \cdot W \cdot \frac{\partial c}{\partial x}, \quad (14)$$

где Q - диффузионный поток через поперечное сечение W в направлении x ;

D - коэффициент молекулярной диффузии, зависящий от плотности жидкой среды;

c - концентрация водного раствора.

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

$$D = D_D + D_M = \delta \cdot V + D_M, \quad (15)$$

где $D_M = \delta \cdot V$ - коэффициент конвективной диффузии;

δ - параметр плотности (плотностной структуры) водного раствора;

V - скорость диффузии водного потока;

D_M - коэффициент молекулярной диффузии;

Роль конвекции и диффузии в переносе загрязняющих веществ может быть определена по безразмерному критерию Пекле [2]:

$$Pe = \frac{V \cdot L_D}{D_M}. \quad (16)$$

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

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

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + (w + w_{c_n} + w_{c_r}) \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} K_c \frac{\partial C}{\partial z} + K_{clv} C + Q \Delta(x - x^*) \Delta(y - y^*) \Delta(z - z^*) - \frac{C}{\tau_0}, \quad (17)$$

где C – концентрация загрязняющих веществ; u, v, w – составляющие скорости циркуляции воды по декартовым осям x, y, z соответственно; w_{cb}, w_{cr} – соответственно гравитационная вертикальная скорость и горизонтальная загрязняющих веществ; τ_0 – постоянная химического разложения загрязняющих веществ; K_c, K_{cl} – вертикальный и горизонтальный коэффициенты турбулентной диффузии, m^2/c ; Δ – дельта-функция, учитывающая отдельную характеристику (параметр) частицы водного потока; Q – производительность (мощность) очистного оборудования, m^3/c ; x^*, y^*, z^* – координаты положения источника загрязнения в трёхмерном пространстве, m .

Установлено, что миграция частиц, находящихся в водных растворах, ограничена объемом, в котором находится этот раствор. Кроме основных характеристик этого потока (подачи стоков на входе и выходе обработанной воды в водоочистном оборудовании, режим движения в зоне исследования частиц и т.п.) необходимо учитывать или поток загрязнений (диффузный или адвективный) либо их концентрацию. На последнее обстоятельство непосредственно влияют граничные условия в которых работают оптико-механические системы направленные на определение гидромеханических параметров частиц примесей водных растворов.

Крайевые условия (основные): $n_{\min} = \infty$ $n_{\min} = 1$ шт.; $n_{\max} = \infty$ шт.; - скорость движения частицы: $v_{\min} = 10^{-5}$ м/с; $v_{\max} = 10^2$ м/с; - линейный размер (эффективный диаметр): $D_{\min} = 10$ мкс; $D_{\max} = 500$ мкс; - размеры зондируемой зоны составляют: $axb_{\min} = 0,01$ м; $axb_{\max} = 1,0$ м; - расстояние до объекта исследования: $L_{\min} = 10$ мм; $L_{\max} = 1000$ мм.

Граничные условия определяют не только крайевые характеристики (параметры) отдельных процессов и технологических операций, которые присутствуют на всех поверхностях, ограничивающих рассматриваемую область. Эти условия характеризуют либо концентрацию водного раствора, либо параметры отдельных частиц этого раствора или крайевые граничные условия движения отдельных частиц.

С учётом граничных условий, в самом общем виде, получаем следующую зависимость:

$$a \cdot \left[K_c \cdot \frac{\partial C}{\partial n} - (\beta_i + w_{c_n} + w_{c_r}) \cdot C + Q_i \right] \cdot d \cdot \left[K_c \cdot K_{cl} \cdot \frac{\partial C}{\partial n} + (C_v + C_\xi + C_D + C_n) \cdot C + Q_i \right] + b \cdot (C - C_i) = 0 \quad (18)$$

где a, d и b – задаваемые коэффициенты, принимающие значения либо 0, либо 1; β_i – параметры взаимодействия загрязнений с водой (зависят от скорости циркуляции, производительности водоочистного оборудования и объёма сточных вод); Q_i – известное количество загрязняющих веществ, поступающих в единицу времени, mg/m^3 ; $K_c(\partial C/\partial n)$, $K_c \cdot K_{cl}(\partial C/\partial n)$ – нормальная составляющая турбулентного потока загрязняющих веществ через боковой (жидкий) контур; $K_c(\partial C/\partial n)$, $K_c \cdot K_{cl}(\partial C/\partial n)$ – нормальная составляющая движения, исследуемых частиц в водном потоке.

С учётом динамических условий пассивности «поведения» загрязнений и частиц водных растворов

основные уравнения (17, 18) принимают следующий вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + w \frac{\partial C}{\partial z} = K_c \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + K_{cl} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + K_{cx} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}. \quad (19)$$

Данное уравнение учитывает следующие условия математического моделирования. Во-первых, концентрацию загрязнений в начале обработки стоков и после их очистки с учётом турбулентной диффузии водных потоков и основных параметров потока в этих условиях. Во-вторых, гидродинамические параметры и характеристики частиц примесей водных потоков определяют в условиях установившегося потенциального движения.

Условия потенциального движения приводят к значительным упрощениям [23] вследствие изменения концентрации водных растворов (сточных вод), параметры и характеристик частиц примесей водных растворов остаются неизменными и их определение возможно в любом месте водного потока.

Природные и сточные воды содержат кроме истинно растворённых веществ также коллоиднорастворённые и суспендированные (взвешенные вещества) частицы различной степени дисперсности [9].

Следует отметить, что в большинстве случаев различные методы дисперсионного анализа дают довольно разноречивые сведения о размерах частиц. Существенную роль при этом, очевидно, играют состав дисперсионной фазы и наличие у её частиц гидратных оболочек [4].

Частицы взвесей многообразны по форме: шаровые, кубические, пластинчатые, близкие к ним или имеют сложную структуру. Для выражения размера частиц сложной формы введено определение приведенного диаметра, представляющего собой диаметр шара, равновеликого по объёму частице [6].

Для оценки распределения частиц по гидравлической крупности служит седиментационный анализ. Размер частиц выражается косвенным образом по скорости их осаждения, которую определяют экспериментальным путём.

Кроме того, использование современных средств контроля, предполагает определения некоторых специфических характеристик жидких сред: количества частиц, концентрации водных растворов и т.п.

Фазы, которые составляют систему, имеют поверхность раздела и потому могут быть механически отделены одна от другой.

Основные закономерности процесса разделения можно получить исходя из его материального баланса. Пусть рассматривается разделение системы, которая состоит из вещества a (однородная фаза) и взвешенных частиц вещества k (дисперсная фаза). Примем обозначения:

G_c, G_p, G_o – соответственно, массы исходной смеси, осветлённой жидкости и полученного осадка;

x_c, x_p, x_o – содержимое вещества R в исходной смеси (водного раствора, сточных вод и др.), осветлённой жидкости и осадке в массовых долях.

При условии отсутствия потерь уравнение материального баланса процесса будет иметь вид:

- для общей массы веществ:

$$G_c = G_p + G_o; \quad (20)$$

- для массы дисперсной фазы (вещества):

$$G_c x_c = G_p x_p + G_o x_o, \quad (21)$$

где G_c , G_p , G_o - соответственно, массы исходного водного раствора (сточных, раствора вод и др.), обрабатываемых стоков (жидкости) и образующегося (полученного) осадка;

X_c , X_p , X_o - содержание вещества R в исходной смеси, (водного раствора, сточных вод и др.), обрабатываемых стоков (жидкости) и образующегося (полученного) осадка;

Основные закономерности процессов, происходящих в системах промышленного водоснабжения можно получить, используя условия уравнения материального баланса. Рассмотрим отдельные составляющие системы промышленного водоснабжения:

- процесса обработки сточных вод (G_{CB}), поступающих на очистку, в которых определяются параметры ($G_{CB}^{OПТ}$) частиц водных растворов и характеристика (состояние) жидких отходов ($G_{CB}^{ОСАД}$) промышленного производства, образующихся при обработке сточных вод.

А также количественный состав x_{CB} , $x_{CB}^{OЧ}$, $x_{CB}^{OПТ}$, $x_{ж.о}$ - частиц, входящих в состав составляющих элементов промышленного водоснабжения выходных потоков: прошедших обработку ($x_{CB}^{OЧ}$), в сточной воде, в которой определяются гидромеханические параметры частиц водных растворов ($x_{CB}^{OПТ}$) оптико-механическими методами и находящихся в жидких отходах ($x_{ж.о}$), образующихся вследствие обработки промышленных стоков.

В случае незначительных количественных потерь (величиной гидравлических сопротивлений можно пренебречь) сточных вод, находящихся в системах промышленного водоснабжения, уравнение материального баланса принимает следующий вид:

- для общей массы вещества:

$$G_{CB} = G_{CB}^{OЧ} + G_{CB}^{OПТ} + G_{CB}^{Ж.О.}; \quad (22)$$

- для массы дисперсной фазы (частицы) вещества:

$$G_{CB} \cdot x_{CB} = G_{CB}^{OЧ} \cdot x_{CB}^{OЧ} + G_{CB}^{OПТ} \cdot x_{CB}^{OПТ} + G_{CB}^{Ж.О.} \cdot x_{ж.о}. \quad (23)$$

Анализ составляющих уравнения материального баланса (23) показывает, что общая масса дисперсной фазы (частиц) вещества, находящихся в сточных водах имеет одинаковую количественную величину (объём, вес). Это обусловлено тем, что оптические методы контроля (определение параметров частиц водных растворов) не вносят количественные и качественные изменения в общий объём сточных вод. Поэтому их математическое и фактическое равенство необходимо учитывать в дальнейших расчётах:

$$G_{CB}^{OЧ} \cdot x_{CB}^{OЧ} = G_{CB}^{OПТ} \cdot x_{CB}^{OПТ}. \quad (24)$$

С целью упрощения дальнейших расчётов математические преобразования определяются следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{array}{l} G_p \cdot x_p = G_{CB}^{OЧ} \cdot x_{CB}^{OЧ} \\ G_p \cdot x_p = x' \cdot (G_{CB}^{OПТ} \cdot x_{CB}^{OПТ}) \end{array} \right\} \quad (25)$$

где x' - коэффициент, учитывающий состояние жидких отходов на стадии их обработки, переработки, нейтрализации и т. п.

С учётом условий формирования и протекания процессов в системе промышленного водоснабжения уравнение позволяет определять гидромеханические параметры частиц ξ , V , D , n оптико-механическими системами.

Окончательная формула определения гидромеханических параметров частиц водных растворов (эффективного диаметра, электрокинетического дзета-потенциала, электрофоретической скорости, количества частиц) принимает следующий вид:

$$n \cdot \frac{\partial C_2}{\partial t} = C_D \cdot \frac{\partial C_1}{\partial x^3} + C_V \cdot \frac{\partial C_2}{\partial x^2} + C_\xi \cdot \frac{\partial C_3}{\partial x^3} + C_n \cdot \frac{\partial C_4}{\partial x^4} - v \frac{\partial C_5}{\partial x}, \quad (26)$$

где C_D , C_V , C_ξ , C_n - определяемые гидромеханические параметры частиц водных растворов, соответственно эффективный диаметр, электрофоретическая скорость, электрокинетический дзета-потенциала и количество частиц;

Данное уравнение учитывает исследуемые параметры и характеристики частиц примесей водных растворов в потоке. Его решение при граничных условиях позволяет производить математические расчёты, результаты проверить в динамических условиях разработанными оптическими схемами, а контролировать и управлять системами контроля - разработанными программами. Последнее обстоятельство является основой для автоматизации работы систем оборотного водоснабжения в части управления процессами контроля качества обработки сточных вод.

С учётом выше изложенного, а также учитывая, что между параметрами ξ , V , D и n имеет место не только функциональная, но и математические зависимости. Согласно условиям материального баланса, для общей массы и массы дисперсной фазы водного раствора получаем уравнение, учитывающее взаимосвязь происходящих процессов в системах оборотного водоснабжения:

$$G_{CB} \cdot x_{CB} = G_{CB}^{OЧ} \cdot x_{CB}^{OЧ} + G_{CB}^{OПТ} \cdot x_{CB}^{OПТ} + G_{CB}^{Ж.О.} \cdot x_{ж.о}. \quad (27)$$

Полученная зависимость позволяет определять некоторые параметры частиц водных растворов установок комбинированного типа при электрохимической коагуляции-флотации.

Исходя из условий движения частицы при седиментации, величина эффективного диаметра определяется по формуле:

$$D = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta \cdot V_B}{g \cdot (\rho - \rho_1)}}. \quad (28)$$

Определение оптимального (точного) значения эффективного диаметра возможно при условии, когда его величина зависит от известных параметров. Величина эффективного диаметра D является функцией от следующих величин:

$$D = f(v, t). \quad (29)$$

В свою очередь, скорость движения частицы определяется горизонтальной и вертикальной составляющими в процессе электрофореза и седиментации.

Кроме времени t_1 увеличения амплитуды доплеровского сигнала, движение частицы характеризуется

временем t_2 постоянной величины сигнала и временем t_3 затухания этого сигнала. Производными сигнала являются период T_1 и приращение увеличения периода ΔT_s доплеровского сигнала.

Для определенных условий движения частиц примесей в водных растворах имеет место система уравнений определения величины D эффективного диаметра:

$$\left. \begin{aligned} D &= f(V_G, V_B) \\ D &= f(t_1, t_2, t_3, T_1, \Delta T_s) \end{aligned} \right\} (30)$$

Полученное значение эффективного диаметра D зависит от многих параметров, которые определяются по аналитическим (математическим) зависимостям с помощью разработанных оптических схем величина и математических программ. Последнее обстоятельство является основой для управления процессами контроля параметров частиц и автоматизации контроля в системах промышленного водоснабжения.

Таким образом, установленная зависимость определения гидромеханических параметров частиц водных растворов позволяет получить значение линейного размера (эффективного диаметра), которое является производной от нескольких параметров движения искомой величины.

Дальнейшее совершенствование предлагаемой численной модели создаёт условия для оперативного контроля и управления процессами определения качества обработки сточных вод. С учётом полученных результатов, создают условия для определения следующих параметров водных растворов: электрокинетического дзета-потенциала [12], электрофоретической скорости V [19, 21] эффективного диаметра D [19-21] и количества частиц n примесей водных растворов [21].

Разработанные и модернизированные оптические схемы позволяют регулировать и управлять следующими их техническими характеристиками и параметрами: освещением электрофоретической камеры в двух плоскостях [18], электрофоретической скоростью и количеством частиц [16, 17], углом освещения зондируемой зоны скорости и эффективным диаметром [11-14], расстоянием до исследуемого объекта [16, 21].

Кроме того, используется призма Дове [8, 12], введена дополнительная электрофоретическая камера [13], установлен блок обработки полученной информации [14] для проведения измерений в режиме реального времени, используется электромеханический модулятор для освещения частицы через каждые 90° [21], голо-

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В. Лабораторные исследования жидких сред. / В. Андреев, Е. Попечителей. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1981. – 312 с.
2. Артамонов В. Процеси і апарати технології водоочистки: Навч. посібник/ В. Артамонов, Т. Вижевська. – Рівне: РДГУ, 1999. – 127 с.
3. Бокштейн Б. Атомы блуждают по кристаллу/ Б. Бокштейн. — М.: Наука, 1984. — 208 с.
4. Гороновский И. Физико – химическое обоснование автоматизации технологических процессов обработки сточных вод / И. Гороновский. К.; Наук. думка, 1975. – 213 с.

грамма для определения расположения частицы в жидкой среде [22].

Важным параметром оптической схемы [19, 20] является расстояние до зондируемой зоны, которое определяет мобильность измерительной схемы, освещение измерительной схемы в одной, двух и др. плоскостях [20, 12] и другие конструктивно-технологические параметры и элементы систем.

ВЫВОДЫ

Таким образом, использование оптических методов контроля для лабораторного исследования, промышленного контроля различных жидких сред позволяет расширить не только функциональные возможности уже известного оборудования, но и является основой для разработки нового поколения оборудования для водохозяйственного комплекса.

Среди основных выводов необходимо отметить следующее:

1. Использование разработанных оптических схем позволяет установить диапазон измерительных параметров и характеристик частиц примесей водных растворов, сточных вод, чистой воды и других аналогичных технических жидкостей.

2. В результате исследования движения частиц примесей водных растворов установлены параметры и характеристики, которые являются определяющими: времени t_1 увеличения амплитуды доплеровского сигнала частица, времени t_2 постоянной величины сигнала и времени t_3 затухания этого сигнала. Производными доплеровского сигнала являются период T_s и приращение увеличения периода ΔT_s доплеровского сигнала.

3. Установленные с помощью математических зависимостей основные параметры и характеристики частиц примесей водных растворов позволяют с высокой точностью (3,5-5,0%) производить измерение эффективного диаметра, электрокинетического дзета-потенциала и других параметров и частиц примесей водных растворов.

4. Использование математического аппарата, в основе которого используются известные уравнения неразрывности потока, движения частиц примесей водного потока и сохранения материального баланса, позволяет повысить точность определения искомых величин.

5. Евстратова К. Физическая и коллоидная химии: Учебн. для фарм. вузов и факультетов / К. Евстратова, Н. Купина, Е. Малахова // Под ред. К. Евстратовой. – М.: Высш. шк., 1990.- 487 с.

6. Куликов Н. Теоретические основы очистки воды: учебное пособие /Н. Куликов, А. Найманов, Н. Омельченко, В. Чернышев.- Донецк: изд-во «Ноулидж» [Донецкое отделение], 2009. – 298 с.

7. Ландау Л. Статистическая физика/ Л. Ландау, Е. Лифшиц. Часть 1. — Издание 5-е. — М.: Физматлит, 2005. — 616 с. — («Теорет. Ф-ка», том V).

8. Лаврентьев М. Проблемы гидродинамики и их математические модели/ М. Лаврентьев, Б. Шабат. Изд. 2-е с изм. Главн. ред. физико-матем. литер. Изд-во «Наука», 1977. – 408 с.

9. Лурье Ю. Химический анализ производствен-

ных сточных вод / Ю. Лурье, А. Рыбникова. Изд. 4 – е перераб. и доп. М.: Химия, 1974. – 336 с.

10. Мовчан С. Обработка параметров частиц водных растворов при интенсификации работы оборотных систем водоснабжения / С. Мовчан. MOTROL. Commission of motorization and energetic in agriculture. – 2014, Vol. 16, No. 6. 141-150.

11. Патент на корисну модель № 34874 Україна, МПК⁷ G 01 N 15 / 00. Спосіб вимірювання ефективного діаметру та концентрації частинок у розчині / М. В. Морозов, С. І. Мовчан. – Заявка № 2008 03869; заявл. 27. 03. 2008, опубл. 26. 08. 2008, Бюл. № 16.

12. Патент на корисну модель №58534Україна, МПК⁷ G01N15/00. Пристрій для вимірювання швидкості частинки домішок в рідині/М. Морозов, С. Мовчан. Заявка № 201014210; заявл.29.11.2010, опубл.11.04.2011, Бюл. №7.

13. Патент на корисну модель № 79914 Україна, МПК⁷ G01 N 15/00. Спосіб вимірювання швидкості частинки в розчині при електрофорезі / М. Морозов, С. Епоян, С. Мовчан. – Заявка № 2012 11263; заявл. 28.09.2012, опубл. 13.05.2013, Бюл. № 8.

14. Патент на корисну модель № 86614 Україна, МПК⁷ G01 N 15/00. Спосіб контролю якості очищення стічних вод / С. Епоян, М. Морозов, С. Мовчан. – Заявка № у 2013 06821; заявл. 31.05.2013, опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1.

15. Патент на корисну модель № 89040 Україна, МПК⁷ (2014.01) G01 N 15/00. Спосіб вимірювання швидкості частинок у розчині / М. Морозов, Л. Нікіфорова, С. Мовчан. – Заявка № у 2013 12593; заявл. 28.10.2013, опубл. 10. 04. 2014, Бюл. № 7.

16. Пат. на корисну мод. № 93880 Україна, МПК⁷ (2014.01) G01 N15/00. Спосіб вимірювання кількості частинок водних розчинів та порівняння якості очищення стічних вод / С.І. Мовчан. – Заявка № у 2014 02858; заявл. 21.03.2014, опубл. 27.10.2014, Бюл. № 20.

17. Патент на корисну модель № 96828. Україна, МПК⁷ (2015.01) G01 N 15/00. Пристрій для визначення кількості частинок домішок у воді/ С. Мовчан, С. Васюренко, М. Морозов. – Заявка № у 2014 06696; заявл. 16.06.2014. опубл. 25.02.2015, Бюл. № 4.

18. Патент на корисну модель № 97880 Україна, МПК⁷ G 01 N 15/00. Спосіб освітлювання електрофоретичної комірки водного середовища / С. Мовчан. – Заявка № у 2014 11023; заявл. 09.10.2014, опубл. 10.04.2015, Бюл. № 7.

19. Патент на корисну модель № 98160 Україна, МПК⁷ (2014.01.) G01 N15/00. Спосіб подвійного

контролю параметрів частинок водних розчинів/ С. Мовчан, М. Морозов. – Заявка № у 2014 08536; заявл. 28.07.2014; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 8.

20. Патент на корисну модель № 98163 Україна, МПК⁷ (2014.01.) G01 F 15/00. Пристрій для експресного аналізу визначення параметрів частинок водних розчинів / С. Мовчан. – Заявка № у 2014 08539; заявл. 28.07.2014, опубл. 27.04.2015, Бюл. № 8.

21. Патент на корисну модель № 102915 Україна, МПК⁷ (2015.01) G01 N15/00. Пристрій вимірювання гідромеханічних параметрів частинок у водних розчинах при електрофорезі / С. Мовчан. – Заявка № у 2015 05055; заявл. 25.05.2015, опубл. 25.11.2015, Бюл. № 22.

22. Патент на корисну модель № 104806 Україна, МПК⁷ (2015.01) G01 N9/00. Система для визначення розташування частинок в рідинному середовищі/ С. Мовчан. – Заявка № у 2015 06139; заявл. 22.06.2015, опубл. 25.02.2016, Бюл. № 4.

23. Петрова Е. Моделирование оптической части электронной системы контроля индекса ила в аэротенке [Электронный ресурс] / Е. Петрова, В. Тарасюк. – Режим доступа: <http://masters.donntu.edu.ua/2012/fkita/petrova/library/article8.htm>

24. Проскуряков В. Очистка сточных вод в химической промышленности / В. Проскуряков, Л. Шмидт. – Л.: Химия, 1977. – 464 с.

25. Смирнов Д. Автоматическое регулирование процессов очистки природных и сточных вод / Д. Смирнов. – 2 – е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1985. – 312 с.

THE RESEARCH OF THE PROCESS OF PARTICLES OF IMPURITIES MOVEMENT IN THE WETER SOLUTIONS

Summary. Using equations of the continuity of flow, moving particle trajectory and the material balance equation, we showed in our article the computing model of the moving particles impurities in the aqueous solution, which are the basis of the developing and improvement of the optical schemes for their determination hydro-mechanical options and description.

Keywords: circulating water supply, mathematical modeling, the computing model, moving particle trajectory, equation of the continuity of flow, the material balance equation, particles impurities in the aqueous solution, hydro-mechanical options, electrokinetic poten