

## ОБРАБОТКА ПАРАМЕТРОВ ЧАСТИЦ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ПРИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ РАБОТЫ ОБОРОТНЫХ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Сергей Мовчан

Таврический государственный агротехнологический университет  
Адрес: 72310 Запорожская обл., г. Мелитополь, пр. Б. Хмельницкого, 18  
E-mail: e-mail: [movchantsaa@rambler.ru](mailto:movchantsaa@rambler.ru)

**Аннотация.** В статье обоснован выбор оптической схемы для определения электрокинетического дзета-потенциала и гидромеханических параметров частиц, находившихся в водных растворах. Использование разработанных оптических схем интенсифицирует работу оборотных систем водоснабжения за счёт повышения уровня автоматизации и контроля качества очистки сточных вод.

**Ключевые слова:** гидромеханические параметры частиц, оборотные системы водоснабжения, оптические методы лазерной доплеровской интерферометрии, дисперсные частицы, эффективный диаметр, электрокинетический дзета – потенциал, концентрация частиц.

**ВВЕДЕНИЕ** Рыночные условия хозяйственной деятельности являются определяющим фактором во всех сферах производственной деятельности промышленных предприятий. Составной частью производственного процесса большинства промышленных предприятий являются оборотные системы водоснабжения, которые, в свою очередь, зависят от используемой в них воды для различных технологических целей.

Вода - ценнейший природный ресурс. Она играет исключительную роль в процессах обмена веществ, составляющих основу жизни. Огромное значение вода имеет в промышленном и сельскохозяйственном производстве. Общеизвестна необходимость её для производственных и технологических потребностей, а также в хозяйственной деятельности, работе коммунального сектора.

Жёсткие условия проектирования и работы оборотных систем водоснабжения определяют уровень контроля в водных растворах параметров частиц твёрдой фазы, электрокинетического потенциала и других гидромеханических параметров. Поэтому для надёжной и эффективной работы оборотных систем водоснабжения, кроме технологически рациональных способов очистки и обезвреживания сточных вод промышленных предприятий, необходимо использование способов управления процессами контроля основных технологических режимов и параметров, связанных с определением качества очистки сточных вод.

**ОБОСНОВАНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ** - Определённые пути интенсификации работы оборотных систем водоснабжения направлены на решение несколько взаимосвязанных между собой задач. Одним из таких действенных рычагов повышения интенсификации работы оборотных систем водоснабжения является контроль качества очистки сточных вод [1, 2, 3, 4].

Использование различных типов контрольно-измерительных приборов для определения и регулирования качественно-количественных показателей обработки сточных вод промышленных предприятий позволяет решить народно-

хозяйственную проблему, которая состоит в снижении себестоимости очистки сточных вод за счёт интенсификации работы оборотных систем водоснабжения при оценке качественных показателей очистных сооружений.

Актуальной задачей повышения интенсивности работы оборотных систем водоснабжения является разработка и использование современных методов контроля качества сточных вод промышленных предприятий за счёт определения электрокинетического дзета-потенциала и других гидромеханических параметров частиц водных растворов. Например, таких, как эффективный диаметр, электрофоретическая скорость движения частицы, время нарастания амплитуды доплеровского сигнала. Перечисленные параметры оптимизировались с целью повышения интенсивности работы оборотных систем водоснабжения в целом и отдельных её составляющих.

**АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ, МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ** - Процесс очистки сточных вод промышленных предприятий подвергается постоянному контролю на всех этапах выполнения технологических операций. Контроль работы оборотных систем водоснабжения осуществляется, начиная от забора воды из источников (или системы) водоснабжения, продолжается в самом оборудовании после каждой ступени обработки и заканчивается общей оценкой качества очистки сточных вод.

Средства оперативного контроля технологических операций составляют основу информационной системы и являются базой для разработки и усовершенствования отдельных систем автоматического регулирования [5]. Номенклатура и объём промышленного производства этих средств определяют уровень автоматизации на водоочистных станциях. Задача заключается в том, чтобы автоматически контролировать наибольшее число технологических параметров [6].

К области экологических исследований, кроме прямых средств и технологических мероприятий, необходимо отнести косвенные методы, которые разрешают определять отдельные параметры или комплекс гидромеханических параметров. Из-

вестные раньше оптические способы определения параметров частиц водных растворов не в полной мере отвечали поставленной задаче. Поэтому в объеме выполнения исследований, связанных с методикой расчета гидромеханических параметров частиц водных растворов, в зависимости от формы доплеровского сигнала предложено математическое моделирование процесса измерения и анализа полученных экспериментальных результатов.

Автоматические приборы позволяют не только осуществлять постоянный контроль за составом сточных вод на любой стадии очистки, но и осуществлять автоматическое регулирование процесса очистки сточных вод [6, 7].

Определение основных параметров электрокинетических явлений, гидромеханических характеристик частиц водных растворов является основой для создания систем управления и контроля технологических процессов работы оборотных систем водоснабжения. Электрокинетические явления в дисперсной системе связаны с двойным электрическим слоем, который определяет характер подвижности частиц твердой фазы, гидромеханические параметры частиц, к которым относятся: эффективный диаметр, электрический дзета-потенциал и др.

При исследовании частиц твердой фазы водных растворов широко используются оптические методы. К ним относятся микроскопы, нефелометры, кондуктомеры и др.

Для изучения дисперсных частиц растворов ( $D > 0,2$  мкм) обычно используются методы оптической микроскопии. Разработан ряд приборов и методов для микроскопического определения электрофоретической скорости и электрокинетического дзета-потенциала частиц [8 – 12].

Используемые теневые методы основываются на получении изображения плотностных неоднородностей прозрачной среды в результате преломления световых лучей. Их недостатками являются низкий порог чувствительности, сложность приборного оборудования и невысокая точность, что ограничивает их применение в промышленном производстве. Например, при оценке качества очистки сточных вод, когда диаметр частиц находится в пределах 10 ... 150 мкс.

В последнее время в различных отраслях техники и хозяйственной деятельности, фармацевтической промышленности, медицине широко используются методы интерферометрии. Принцип действия интерферометрических систем основан на измерении разности хода двух лучей — опорного и рабочего. Сущность этого метода состоит в том, что при прохождении светового потока через оптическую неоднородность наряду с локальным отклонением световых лучей происходит изменение их фазы, т. е. изменение оптической длины пути, который проходит световой луч. Это изменение фазы можно измерить только с помощью

интерференционных методов, которые обладают высокой чувствительностью, большим быстродействием и широким динамическим диапазоном.

Приборы для определения качественных показателей очистки воды являются приборами целевого назначения и изготавливаются лишь небольшими сериями, а иногда и в единичных экземплярах [19]. Такой подход является наиболее приемлемым для широкого многообразия сточных вод промышленных предприятий, который позволяет обеспечить эффективную обработку практически всех сточных вод, образующихся в промышленном секторе нашей страны.

В Таврическом агротехнологическом университете разработаны оптические схемы, лабораторное оборудование и установки [13] с использованием методов лазерной доплеровской интерферометрии, которые позволяют определять скорость движения частиц  $10^{-5} \dots 10^2$  м/с и диаметр частиц 10 ... 500 мкс. При этом расстояние до объекта исследования в зондируемой зоне находится в диапазоне 10 ... 1000 мм, а размеры составляют 0,01 ... 1,0 мм.

Разработанные оптические методы [14 - 17] работают, используя эффект Доплера, и с помощью источника светового излучения, зеркал, линзы, светового делителя формируют световые пучки, создавая условия для определения электрокинетического дзета-потенциала и гидромеханические параметры частиц, находящихся в водных растворах. В самом общем случае система разработанных оптических способов лазерной доплеровской интерферометрии иллюстрируется блок – схемой, представленной на рис. 1.

Для измерения эффективного диаметра и концентрации частиц, находящихся в водных растворах, создан блок, в котором исследуемый раствор отводится от направления подачи сточных вод на очистку и после очистки, и эталонный раствор, имеющий соответствующую концентрацию  $n_0$ , располагающиеся в одном блоке. С помощью зеркал, светового делителя формируют два когерентных световых пучка, которые с помощью линзы фокусируются под углом  $\alpha$  один к другому в зондируемую зону измерительной ячейки. Угол  $\alpha$  по которому в зондируемую зону направляются в измерительную ячейку зондируемые пучки, определяется по формуле:

$$\alpha = 2 \cdot \arctg \frac{H}{2 \cdot F}, \quad (1)$$

где:  $H$  - расстояние между двумя лазерными когерентными пучками,

$F$  - фокусное расстояние линзы, м.

Вначале определяют количество импульсов  $K_0$  доплеровского сигнала в единицу времени, затем период  $T$  и время  $t$  увеличения амплитуды доплеровского сигнала. С учётом полученной информации рассчитывают эффективный диаметр  $D$  частицы, их концентрацию  $n$  с использованием следующих формул:

$$D = \frac{\lambda \cdot t}{2 \cdot T \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} = \frac{\lambda \cdot t \cdot F}{T \cdot H}, \quad (2)$$

$$n = \frac{K}{K_0} \cdot n_0, \quad (3)$$

где  $\lambda$  - длина волны излучения лазера в исследуемом растворе [14].

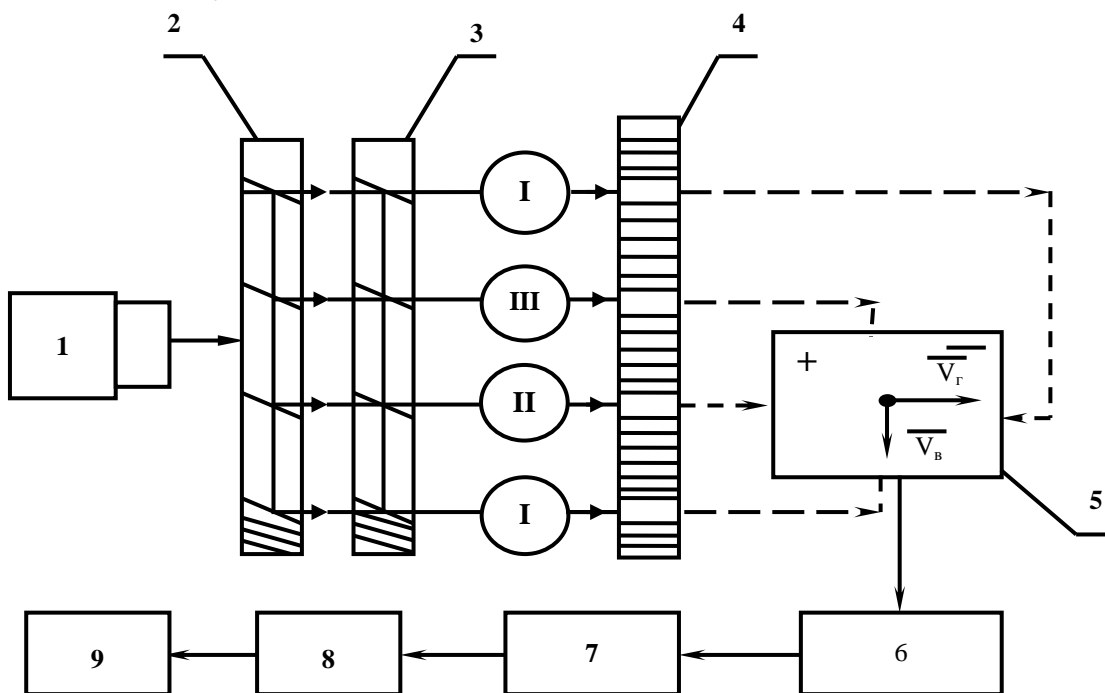


Рис. 1 – Блок-схема оптических способов для определения гидромеханических параметров частиц водных растворов: 1 – источник света, 2 – система зеркал, 3 – линза, 4 – делитель светового потока, 5 – электрофоретическая ячейка, 6 – фотоприёмник, 7 – осциллограф, 8 – счётчик импульсов, 9 – персональный компьютер, I, II, III, IV – каналы

Fig. 1 – Flow chart of optical methods for defining of hydraulic and mechanical parameters of water solutions particles: 1 – light source, 2 – system of mirrors, 3 – lens, 4 – light beam divider, 5 – electrophoresis cell, 6 – photoreceiver, 7 – oscillograph, 8 – pulse counter, 9 – personal computer, I, II, III, IV – channels :

Использование разработанного блока для измерения эффективного диаметра и количества частиц позволяет производить измерения определённых параметров на действующем технологическом оборудовании, что расширяет функциональные возможности оборудования. Осуществление такого способа возможно путём сравнения двух растворов: исследуемого и эталонного.

В соответствии с разработанным устройством для измерения скорости частиц водных растворов, который содержит световой делитель, зеркал и линзы формируют два световых пучка, расположенных под углом  $\alpha$ . Величина угла между лазерными лучами определяется по формуле:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{H}{2 \cdot F}, \quad (4)$$

где:  $H$  - расстояние между двумя лазерными лучами, м,

$F$  - фокусное расстояние линзы, м.

Автоматически в реальном времени определяют период  $T$  доплеровского сигнала и вычисляется скорость  $\mathcal{D}$  частицы по формуле:

$$\mathcal{D} = \frac{\lambda}{2 \cdot T \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (5)$$

где:  $\lambda$  - длина волны излучения лазера в водном растворе, мкм [15].

Использование устройства для определения скорости осуществляется путём изменения расстояния  $H$  между светоделителем и зеркалом, что приводит к изменению угла  $\alpha$  между двумя зондирующими лучами. Использование аналого-цифрового преобразователя и демодулятора расширяет функциональные возможности оборудования и смену чувствительности прибора.

Способ определения скорости частицы в водном растворе при электрофорезе осуществляется с помощью формирования второго измерительного канала. Использование лазера, системы зеркал и линзы освещают частицу, находящуюся на расстоянии  $l$  от предыдущего положения частицы в электрофоретической камере. Регистрируют интенсивность светового потока частицею, которая движется со скоростью  $v_2$ . Автоматически в режиме реального времени определяют

частоту  $\nu_2$  второго доплеровского сигнала и время  $t$  между двумя доплеровскими сигналами, определяют мгновенную скорость  $U_2$  частицами в другом положении и среднюю скорость  $U$  с использованием следующих формул:

$$\nu_2 = \frac{\lambda \cdot \nu_2}{2 \cdot \sin \frac{\alpha_2}{2}}, \quad (6)$$

где:  $\alpha_2$  - угол между двумя лучами для второго измерительного канала, град. [16],

$$U = \frac{l}{t}. \quad (7)$$

Использование аналого-цифрового преобразователя и персональной электрической вычислительной машины создаёт условия для измерения параметров в реальном времени. Таким образом, расширяются функциональные возможности рассмотренного способа измерения скорости частиц водных растворов при электрофорезе в режиме реального времени.

Для измерения концентрации частиц водных растворов формируются два когерентных световых пучка, которые фокусируются под углом  $\alpha$  один к другому в измерительную ячейку. Регистрация интенсивности света осуществляется фотоприёмником, выход с которого электрически связан с цифровым запоминающим осциллографом и счётчиком импульсов доплеровских сигналов. Использование двух ячеек: исследуемой и с эталонным или буферным раствором, для измерения параметров позволяет определять периоды  $T_1$  та  $T_2$  доплеровских сигналов и количество доплеровских импульсов  $K_1$  та  $K_2$ , что является основой для расчёта скоростей  $v_1$  и  $v_2$  и концентрации частиц  $n_1$  и  $n_2$  примесей до и после очистки последующим формулам:

$$v_1 = \frac{\lambda}{2 \cdot T_1 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} \quad v_2 = \frac{\lambda}{2 \cdot T_2 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (8)$$

$$n_1 = \frac{k_1}{v_1}, \quad n_2 = \frac{k_2}{v_2}, \quad (9)$$

где:  $\lambda$  - длина волн излучения гелий-неонового лазера [17 – 13].

Качество  $C$  (степень) очистки сточных вод определяется отношением концентрации  $n_1$  частиц до очистки к концентрации  $n_2$  частиц в растворе после очистки [17]:

$$C = \frac{n_1}{n_2}. \quad (10)$$

Разработанный способ контроля качества очистки сточных вод обеспечивает точность из-

мерения концентрации частиц примесей в водных растворах.

Использование разработанных способов и технологических решений повышает надёжность приборного оборудования, которая возможна даже при переменной проводимости (мутности) водного раствора. Кроме этого обеспечивается мобильность в определении параметров частиц водных растворов, состоящую в готовности к установке и определению без регулировки и автоматической настройки чувствительности.

**ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ И ЕЁ АКТУАЛЬНОСТЬ** - При разработке, проектировании и эксплуатации локальных схем очищения производственных сточных вод важное место занимают технологии контроля качества очищения и измерение параметров частиц примесей, входящих в состав сточных вод. Методы лазерной доплеровской интерферометрии обеспечивают определение скорости, эффективного диаметра, электрокинетического потенциала и концентрации частиц примесей водных растворов дистанционно, в режиме реального времени с достаточно высокой точностью [1 - 3].

Вместе с тем возможности автоматизации несколько ограничены. Особенно ощутима эта ограниченность при использовании типичных схем автоматизации и при неблагоприятных динамических характеристиках узла реагентной обработки [22].

Представленный анализ работы приборного оборудования, используемого для определения параметров частиц, находящихся в водных растворах, в процессах электрофореза и седиментации, отстаивания и флотации, обработке вод с использованием коагулянтов, и определяет сущность поставленной проблемы, состоящей в разработке надёжных и эффективных способов при определении качественного состава обработки сточных вод.

Причинами существования рассмотренной проблемы являются следующие условия: невысокая эффективность управления процессом определения дзета-потенциала, эффективного диаметра и др. параметров.

Негативными последствиями не решения поставленной проблемы являются загрязнение водных объектов страны, увеличение антропогенного влияния на окружающую среду вообще и на водные объекты страны конкретно.

Пути решения поставленной проблемы состоят в решении организационно-технических мероприятий (разделение состава сбрасываемых сточных вод, использование высокоэффективных способов интенсификации работы обратных систем водоснабжения, а также эколого-экономических и социальных мероприятий (уменьшение уровня нагрузки на водные объекты, предотвращение загрязнения окружающей среды и др.)

Комплексное решение поставленных проблем в работе оборотных систем водоснабжения определяет научно-прикладную задачу, состоящую в определении электрокинетического потенциала и гидромеханических параметров частиц водных растворов, которая подчёркивает актуальность проведенных научно-исследовательских работ. Техническое обеспечение последних научных разработок поднимает на новый уровень работу оборотных систем водоснабжения в части интенсификации их работы.

Причинами существования поставленной проблемы являются: отсутствие комплексного подхода к работе оборотных систем водоснабжения, повышение уровня их интенсификации и отсутствие условий обеспечения надёжности отдельных составляющих технологического процесса.

Научно-прикладная проблема состоит в установлении математических зависимостей между гидромеханическими параметрами частиц водных растворов при исследовании процесса оценки качества очистки сточных вод промышленных предприятий.

**ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ** - Для повышения уровня интенсификации процесса оценки качества сточных вод при электрофорезе и седиментации необходимо определять гидромеханические параметры частиц водных растворов.

Целью работы является повышение уровня интенсификации работы оборотных систем водоснабжения за счёт разработки эффективных оптических схем лазерной интерферометрии.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Определить гидромеханические параметры, влияющие на эффективность очистки сточных вод в процессах электрофореза и седиментации частиц водных растворов.

2. Разработать методику математического расчёта и провести обработку полученных результатов экспериментальных исследований изменений эффективного диаметра в зависимости от времени нарастания амплитуды доплеровского сигнала.

**ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ** - Известно, что вода как полярный растворитель является не просто инертной средой, в которой могут быть растворены различные вещества, но и матрицей, накладывающей значительный отпечаток своих свойств на физико-химические свойства образующейся гомогенной системы. Некоторые авторы указывают на двухпольную модель гидратации. В структуре разбавленных электролитов, которые являются моделями природных пресных вод, некоторые исследователи [18], различают три слоя воды. При этом у каждого положительного или отрицательно гидратирующего иона образуется слой первичной гидратации, второй слой находится под ориентирующим влиянием кулоновского поля иона, частично экранированного

предыдущим слоем и свободных молекул последующего слоя [19].

Кроме того, частицы коллоидных растворов находятся в непрерывном хаотическом движении, они постепенно передвигаются от мест с большей концентрацией к местам с меньшей концентрацией, т. е. им присущи свойства диффузии. В связи со значительными размерами коллоидных частиц истинных растворов высокомолекулярных соединений скорость их диффузии во много раз меньше скорости диффузии молекул в реальных условиях [20].

В гетерогенных дисперсных системах, а к таким относятся большая часть сточных вод промышленных предприятий, на границе раздела между фазами обычно возникает электрический потенциал. Его возникновение осуществляется двумя путями. Первый путь возникновения потенциала связан с адсорбцией потенциалопределяющих ионов. Возникновение потенциала этим путём происходит в том случае, когда в дисперсной среде содержатся ионы, входящие в состав частиц твёрдой фазы. Второй путь возникновения потенциала заключается в том, что поверхностные молекулы частиц твёрдой фазы диссоциируют в данной жидкой среде на ионы: один из ионов переходит в диспергированную среду, а на поверхности остается ион противоположного знака [20].

Также известно, что на двойной электрический слой оказывает влияние тот факт, что ионы наружной обкладки находятся под действием двух противоположно направленных сил. Первая сила - электростатическое притяжение противоположно заряженной поверхности твёрдой фазы, вторая сила обусловлена тепловым движением противоположно заряженных ионов, стремящихся оторвать их от поверхности и распределить равномерно по всему объёму жидкости [20, 21].

С учётом выше изложенного можно предположить, что с увеличением размеров частиц водных растворов силы электростатического притяжения и сила теплового движения этих противоположно заряженных ионов будет увеличиваться. Поэтому частицы большего диаметра, находящиеся в водных растворах, будут определяющим фактором.

Однако, надо иметь в виду, что частиц большего диаметра в водных растворах не всегда будет большее количество по численности. Это обусловлено составом сточных вод, поступающих на очистку, выбранной технологией их обработки или нейтрализации, механизмом образования частиц водного раствора, наличием и величиной сил притяжения и др.

Поэтому, определение электрокинетического дзета-потенциала, диаметра, электрофоретической скорости частиц, находящихся в водных растворах, представляется важной задачей, имеющей прикладной характер.

:

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований определения эффективного диаметра частиц водных растворов

Table 1. The results of experimental researches for the definition of effective diameter of water solutions particles

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Измеренный диаметр частицы $D, 10^{-6}, \text{ м}$	4,92	9,95	14,76	18,56	23,25	28,56	34,06	36,58	42,34	49,40
	4,87	9,42	14,18	18,38	24,06	28,73	33,78	37,23	43,56	48,78
	4,89	9,40	14,32	17,32	24,52	27,78	33,56	38,45	47,28	49,04
	4,78	9,56	14,67	19,01	23,87	24,06	34,45	39,05	49,03	48,39
Диаметр (округлённый), $D_{\text{окр}}, 10^{-6}, \text{ м}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50

Определяя потенциал и гидродинамические параметры частиц, исследователи получают действенный инструмент для управления и регулирования сложными физико-химическими процессами, происходящими при очистке сточных вод, нейтрализации вредных компонентов и т. п.

Величина электрокинетического  $\xi$  дзета – потенциала определяется по формуле Смолуховского:

$$\xi = \frac{3 \cdot \eta \cdot \nu}{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E}, \quad (11)$$

где:  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость,  $\eta$  – вязкость жидкости,  $E$  – напряженность электрического поля,  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф / м}$  – электрическая постоянная.

Из наведенной формулы (11) видно, что одним из параметров, определяющих величину электрокинетического потенциала, является электрофоретическая скорость. Эффективный диаметр напрямую зависит от электрофоретической скорости, что и является определяющим при обработке полученных экспериментальных зависимостей.

Эффективный диаметр каждой частицы водного раствора при электрофорезе определяется по формуле:

$$D = t_1 \cdot \nu_1 \cdot \cos \alpha, \quad (12)$$

где:  $\nu_1$  – электрофоретическая скорость, м/с,  $t_1$  – время увеличения амплитуды доплеровского сигнала, сек,  $\alpha$  – угол между двумя пучками измерительной установки, град.

Обработка полученных результатов лабораторных исследований осуществляется в такой последовательности:

1. Для каждого значения повторностей измеренного эффективного диаметра  $D_{\text{о}}$  необходимо вычислить среднеарифметическое значение по результатам проведенных измерений, которые определяются по формуле:

$$D_{\text{нр.д.д.}} = \frac{D_{H1} + D_{H2} + \dots + D_{Hn}}{n} \quad (13)$$

где:  $D_{\text{нр.д.д.}}$  – среднеарифметическое значение диаметра,  $D_{f1}, D_{f2}, \dots, D_{fn}$  – значение диаметров

по вариантам, определяемых путём опытов,  $n$  – общее число вариантов данной совокупности.

2. Отклонение  $\Delta$  среднеарифметического значения, полученное по результатам измерений величины диаметра  $D_{\text{о}}$ , а также который получен в результате измерений и определения средней величины  $D_{\text{ср.д.д.}}$ , определяем по формуле:

$$\Delta = D_{\text{ср.д.д.}} - D_{\text{о}}. \quad (14)$$

3. Вариации  $\eta$  результатов измерений, полученных линейных размеров (диаметров), значений между самым большим и самым маленьким, которые соответствуют одному блоку диапазона измерений, для одного и того же измерения результат которого определяется по формуле:

$$\eta = D_{\text{max}} - D_{\text{min}}. \quad (15)$$

4. Далее необходимо выбрать значение самой большей погрешности и вариации.

По выбранным значениям абсолютной систематической погрешности и большего значения вариации необходимо сделать вывод о том, что находятся данные величины в поле допустимых погрешностей процесса измерения и определения гидромеханических параметров частиц водных растворов.

5. Сумма квадратов между расчётным и округлённым диаметрами для каждого ряда определяется по формуле:

$$\sum_{i=1}^n (D_{\text{д.д.д.}} - D_{\text{д.д.д.}})^2. \quad (16)$$

6. Величину среднеквадратического отклонения  $\sigma$  экспериментальных данных от результатов теоретических исследований определяют по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_{\text{расч.}} - D_{\text{опыт.}})^2}{n-1}}. \quad (17)$$

Таким образом, максимальное среднеквадратическое отклонение экспериментальных и теоретических результатов равно  $\sigma_{\text{MAX}} = 0,0071 \text{ м}$ , а минимальное среднеквадратическое отклонение –  $\sigma_{\text{MIN}} = 0,00425 \text{ м}$ .

Результаты математической обработки экспериментальных исследований представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты математической обработки полученных измерений эффективного диаметра

Table 2. The results of mathematical processing of received data after effective diameter measurement

№ серии	Округлённый диаметр частицы, мм	Диаметр частицы, D, мкм				Среднеарифметическое значение эффективного диаметра, мкм	Среднеарифметического отклонение $\Delta$	Вариации $\eta$	Среднеквадратического отклонения $\sigma$
		1	2	3	4				
1.	5	4,95	4,90	5,00	4,95	4,95	0,05	0,1	0,071
2.	10	9,95	9,90	9,85	9,90	9,9	0,1	0,1	0,015
3.	15	14,90	14,95	15,00	15,00	14,9625	0,0375	0,1	0,00417
4.	20	19,95	19,95	20,00	19,90	19,95	0,05	0,1	0,00425
5.	25	24,90	24,95	24,95	25,00	24,95	0,05	0,1	0,005
6.	30	29,90	29,90	29,95	29,90	29,9125	0,0875	0,05	0,01083
7.	35	34,85	34,90	34,95	34,95	34,9125	0,0875	0,1	0,0125
8.	40	39,95	39,90	39,85	40,00	39,925	0,075	0,15	0,00867
9.	45	44,90	44,95	45,00	45,00	44,9625	0,0875	0,1	0,004167
10.	50	49,80	49,85	50,00	49,90	49,8875	0,0125	0,15	0,0242

Для связи с другими гидродинамическими параметрами частиц водных растворов вычисления электрофоретической скорости движения частицы и времени нарастания амплитуды доплеровского сигнала выполним по следующим формулам.

1. Уточняем действительное значение электрофоретической скорости движения частицы по формуле:

$$v = 2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E \cdot \frac{\zeta}{3 \cdot \eta}, \quad (18)$$

где:  $\varepsilon_0$  - электрическая постоянная,  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф / м,  $\varepsilon$  - относительная диэлектрическая постоянная жидкости,  $\eta$  - вязкость жидкости, E - напряжённость электрического поля,

2. Время нарастания амплитуды доплеровского сигнала определяем по формуле:

$$t_1 = \frac{x_1}{V} = \frac{D}{V \cdot \cos \alpha / 2}. \quad (19)$$

где:  $\tilde{O}_1$  - расстояние до максимального увеличения величины эффективного диаметра, м, V - электрофоретическая скорость, м / с,  $\cos \alpha$  - угол между двумя зондирующими пучками, град., D - эффективный диаметр, мкм.

Результаты определения времени увеличения амплитуды доплеровского сигнала (мс), при значениях электрофоретической скорости движения частицы (м / с), находящихся в диапазоне  $v = 0,35 \div 0,40$  м / с, при этом угол между двумя зондируемыми пучками изменяется. Использование разработанной математической программы

позволяет определить из каждой серии опытов среднюю величину, которая сравнивается с округлённым диаметром для каждой серии. Затем определяется величина среднеарифметического отклонения  $\Delta$  и вариации  $\eta$ .

Определенная сумма квадратов между расчётным и округлённым диаметрами для каждого ряда позволяет определить величину среднеквадратического отклонения  $\sigma$ . При этом максимальное среднеквадратическое отклонение экспериментальных и теоретических результатов равно  $\sigma_{\text{MAX}} = 3,825 \cdot 10^{-6}$  м - для диаметров, не превышающих  $30 \cdot 10^{-6}$  м, а минимальное среднеквадратическое отклонение -  $\sigma_{\text{MIN}} = 0,167$  м - для диаметров, не превышающих  $5 \cdot 10^{-6}$  м.

Графические зависимости, определяющие время нарастания амплитуды доплеровского сигнала  $t_1$ , (мс) от величины измеренного диаметра частицы (D,  $10^{-6}$  м) водного раствора представлены на рис. 2.

Представленные графические зависимости (рис. 2) наглядно демонстрируют, что величины эффективного диаметра определяются путем измерения экспериментальных значений. Величины, которые незначительно отклоняются на уровне  $t_1 = 0,85 \dots 0,90$  мс времени амплитуды доплеровского сигнала, носят случайный характер. Второй уровень  $t_1 = 1,20 \dots 1,40$  мс указывает на то, что, достигая максимального значения, величина доплеровского сигнала соседних частиц начинает существенно влиять на процессы определения гидромеханических параметров частиц.

Таблица 3. Изменение времени нарастания амплитуды доплеровского сигнала

Table 3. The changes in time of raising of the Doppler signal amplitude

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Угол между двумя зондируемыми пучками $\cos \alpha = 5^0 = 0,996$										
Электрофоретическая скорость движения частицы $v = 0,35 \div 0,40$ м / с										
Время нарастания амплитуды доплеровского сигнала $t_1$ , мс	0,15	0,3	0,43	0,6	0,7	0,9	1,007	1,15	1,29	1,43

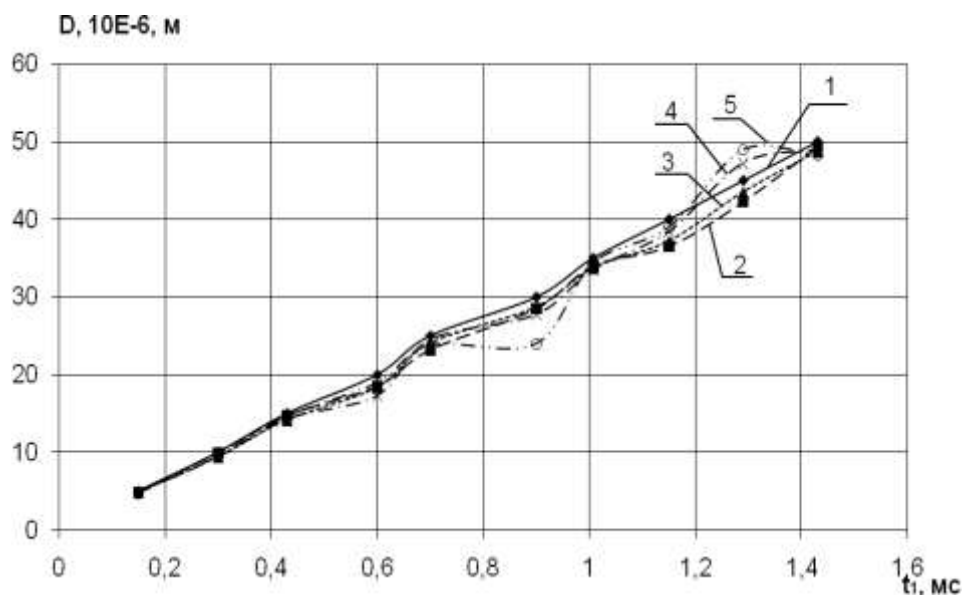


Рис. 2. Зависимость времени нарастания амплитуды доплеровского сигнала  $t_1$ , (мс) от величины измеренного диаметра частицы ( $D \cdot 10^{-6}$ , м) водного раствора: 1, 2, 3, 4 - повторности измерения величины эффективного диаметра, 5 – средняя величина диаметра, определённая в результате расчётов

Fig. 2. Dependence of time of the Doppler signal amplitude raising  $t_1$  (msec) on the measured particle diameter ( $D \cdot 10^{-6}$ , m) of the water solution: 1, 2, 3, 4 are repeated measurements of the effective diameter, 5 is the average diameter defined after calculations

Обусловлено это тем, что интенсивность их движения, находящаяся в ограниченном пространстве, перекрывается расположением – траекториями соседних частиц. Усложняется этот процесс тем, что

размеры большинства частиц, главным образом, диаметрами свыше  $D = (60 \dots 80) \cdot 10^{-6}$  м затрудняют их оценку.

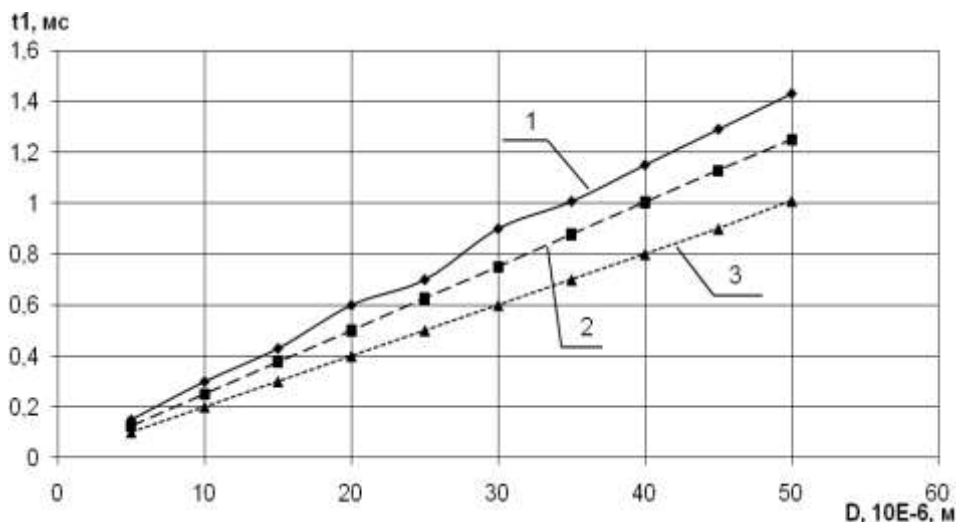
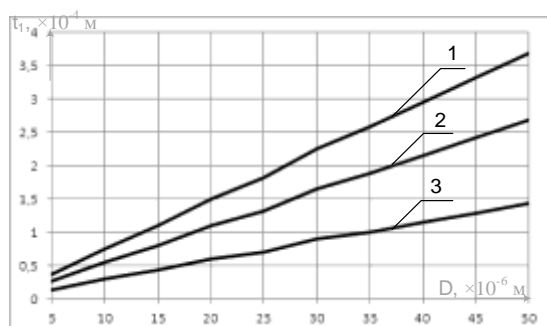


Рис. 3. Зависимость величины эффективного диаметра от времени увеличения амплитуды доплеровского сигнала с учётом обработанной величины среднего значения. Величина угла  $\alpha$  между двумя зондируемыми пучками и электрофоретической скорости движения частицы составляет: 1 -  $\cos \alpha = 5^0 = 0,996$  и  $v = 0,35 \div 0,40$  м / с, 2 -  $\cos \alpha = 5^0 = 0,996$  и  $v = 0,4 \div 0,45$  м / с, 3 -  $\cos \alpha = 5^0 = 0,996$  и  $v = 0,45 \div 0,5$  м / с

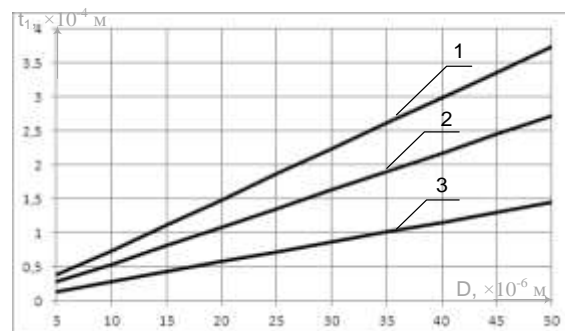
Fig. 3. Dependence of the effective diameter value on the time of raising of the Doppler signal amplitude considering processed mean value. The angle between two sounded beams and electrophoretic rate the particles movement is: 1 -  $\cos \alpha = 5^0 = 0,996$  and  $v = 0,35 \div 0,40$  meters per second, 2 -  $\cos \alpha = 5^0 = 0,996$  and



$v = 0,4 \div 0,45$  meters per second, 3 -  $\cos \alpha = 5^\circ = 0,996$  and  $v = 0,45 \div 0,5$  meters per second



$$\cos 5^\circ = 0,996$$



$$\cos 10^\circ = 0,9848$$

Рис. 4 Зависимость амплитуды увеличения величины доплеровского сигнала ( $t_1 \cdot 10^{-4}$  мс) от величины эффективного диаметра ( $D \cdot 10^{-6}$  м), когда угол между лучами установки изменяется от  $5^\circ$  до  $30^\circ$ , при различных значениях скорости движения частицы:

1 -  $V = 0,35 - 0,40$  м / с, 2 -  $V = 0,40 - 0,45$  м / с, 3 -  $V = 0,45 - 0,50$  м / с

Fig. 4 Dependence of the Doppler signal amplitude ( $t_1 \cdot 10^{-4}$  ms) on the effective diameter ( $D \cdot 10^{-6}$  m), when the angle between the beams is varied  $5^\circ$  to  $30^\circ$ , under different particle movement rates: 1 -  $V = 0,35 - 0,40$  м / с, 2 -  $V = 0,40 - 0,45$  м / с, 3 -  $V = 0,45 - 0,50$  м / с

Анализ графических зависимостей показывает, что они имеют одинаковую тенденцию увеличения. Эта тенденция ближе к прямо пропорциональной зависимости. Отклонение одинаковых характеристик, находящихся в пределах скоростей, не превышает 2,0 – 2,5 %.

Такие значения, параметры движения частицы и характеристики оптической установки являются оптимальными для данных условий движения частиц и параметров измерения установкой.

**ВЫВОДЫ.** Использование различных типов контрольно-измерительных приборов для определения и регулирования качественно-количественных показателей обработки сточных вод зависит от принятой технологии, типа сооружений и оборудования контроля. Разработанные способы контроля на основе лазерных оптических схем позволяют:

1. Повысить уровень автоматизации систем оборотного водоснабжения в части контроля качества очистки сточных вод, что повышает качество их очистки.

2. При обработке экспериментальных данных, в случае, когда изменение диаметров частиц находится в пределах  $5 - 50 \cdot 10^{-6}$  м, максимальное среднеквадратическое отклонение экспериментальных и теоретических результатов равно  $\sigma_{\text{MAX}} = 0,0071$  м, а минимальное среднеквадратическое отклонение -  $\sigma_{\text{MIN}} = 0,00425$  м.

3. В зависимости от величины доплеровского сигнала и эффективного диаметра при условии, когда угол между лучами изменяется в пределах от  $5^\circ$  до  $30^\circ$ , при различных значениях скорости движения частицы составляет для первого случая  $V = 0,35 - 0,40$  м / с, для второго -

$V = 0,40 - 0,45$  м / с и для третьего случая  $V = 0,45 - 0,50$  м / с, графические зависимости имеют одинаковую тенденцию увеличения в виде прямо пропорциональной зависимости. Отклонение одинаковых характеристик не превышает 2,0 – 2,5 %, что свидетельствует о незначительном расхождении теоретических и экспериментальных зависимостей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мовчан С. И. Интенсификация работы оборотных систем водоснабжения / С. И. Мовчан. MOTROL. Commission of motorization and energetic in agriculture. – 2013, Vol. 15, No. 6, 157 – 164.

2. Реконструкция и интенсификация сооружений водоснабжения и водоотведения: Учебное пособие / А.А. Василенко, П.А. Грабовский, Г. М. Ларкина, А. В. Полищук, В. Й. Прогульный. – Киев – Одесса: КНУСА, ОГАСА, 2007. – 307 с.

3. Петросов В. А. Теоретическое обоснование и разработка методов интенсификации работы систем водообеспечения. Дис. ... д. т. н. ХГТУСА. – Х., 1993. – 139 с.

4. Ефремов А. Б. Усовершенствование технологии очистки сточных вод гальванических производств. Дис. ... к. т. н. / Научн. руковод. проф., д. т. н. Эпоян С. М., ХГТУСА. – Х., 2008. – 153 с.

5. Мовчан С. И. Інформаційна модель інтенсифікації роботи оборотних систем водопостачання / С. І. Мовчан, І. С. Шелигіна, О. В. Болтянський, Д. В. Спірінцев // Інформаційні технології в прикладній геометрії / Праці Таврійський державний агротехнологічний університет. Вип. 5, т. 6 - Мелітополь: ТДАТУ, 2013. – С. 76 – 81.

6. Смирнов Д. Н. Автоматическое регулирование процессов очистки природных и сточных вод / Д. Н.

- Смирнов. – 2 – е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1985. – 312 с.
7. Проскураков В. А. Очистка сточных вод в химической промышленности / В. А. Проскураков, Л. И. Шмидт. – Л.: Химия, 1977. – 464 с.
8. Лобачев П. В. Приборы для определения электрофоретической подвижности частиц в дисперсных системах / П. В. Лобачев, М. Н. Кривов // Водоснабжение и санитарная техника. – 1979. - № 9. - С. 4 – 6.
9. Сорокин А. Д. Прибор «Дзета – 2» для автоматического измерения дзета - потенциала коллоидных частиц / А. Д. Сорокин, А. С. Горюнов, А. А. Ткач // Водоснабжение и канализация. К.: 1977. – Вып. 35. – С. 28 – 32.
10. А. с. № 363907 СССР, МКИ С01 N27/26, В 01 К 5/00. Способ определения электрофоретической подвижности частиц суспензий / С. С. Духин, И. Т. Горбачук, В. П. Душенко. № 1673717, Заявл. 16. 06. 71, Оpubл. 25. 12. 73, Бюл. № 4.
11. А. с. № 379866 СССР, МКИ С 01 N 27/26, В 01 Д 5/00. Устройство для микроскопического электрофореза коллоидных систем и суспензий / С. С. Духин, И. Т. Горбачук, В. П. Душенко. - № 1670802, Заявл. 15. 06. 71, Оpubл. 20. 04. 73, Бюл. № 20.
12. А. с. № 442405 СССР, МКИ С 01 N 27/26, В 01 К 5/00. Устройство для микроскопического электрофореза суспензий / С. С. Духин, И. Т. Горбачук, В. П. Семёнов, И. Г. Алесина.- №1805107, Заявл. 30.06. 72, Оpubл. 05. 09. 74, Бюл. № 33.
13. Мовчан С. И. Усовершенствование методов обработки и контроля качества сточных гальванических производств (применительно к предприятиям по ремонту сельскохозяйственной техники): дис ... канд. техн. наук / С.И. Мовчан. - Мелитополь, 2003. – 137 с.
14. Пат. № 34874А Україна, МПК<sup>7</sup> G 01 N 15 / 00. Спосіб вимірювання ефективного діаметру та концентрації частинок у розчині / М. В. Морозов, С. І. Мовчан. – № 2008 03869, заявл. 27. 03. 2008, опубл. 26. 08. 2008, Бюл. № 16.
15. Пат. № 58534 Україна, МПК<sup>7</sup> G 01 N 15 / 00. Пристрій для вимірювання швидкості частинки домішок в рідині / М. В. Морозов, С. І. Мовчан. – № 2010 14210, заявл. 29. 11. 2010, опубл. 11. 04. 2011, Бюл. № 7.
16. Патент на корисну модель № 79914 Україна, МПК<sup>7</sup> G 01 N 15 / 00. Спосіб вимірювання швидкості частинки в розчині при електрофорезі / М. В. Морозов, С. М. Епоян, С. І. Мовчан. – № 2012 11 263, заявл. 28. 09. 2012, опубл. 13. 05. 2013, Бюл. № 8.
17. Патент на корисну модель № 86614 Україна, МПК<sup>7</sup> G 01 N 15 / 00. Спосіб контролю якості очищення стічних вод / С. М. Епоян, М. В. Морозов, С. І. Мовчан. – № u 2013 06821, заявл. 31. 05. 2013, опубл. 10. 01. 2014, Бюл. № 1.
18. Шифрин К. С. Теоретические и прикладные проблемы рассеивания света / К. С. Шифрин. Мн.: Наука и техника, 1971. – с.
19. Гороновский И. Т. Физико – химическое обоснование автоматизации технологических процессов обработки воды / И. Т. Гороновский. К.: Наукова думка, 1975. – 214 с.
20. Галинкер И. С. Физическая и коллоидная химия / И. С. Галинкер, П. И. Медведев. Учебн. пособ. для студентов сельхоз. вузов, Высш. шк., М., 1972. – 204 с.
21. Веселов Ю. С. Водоочистное оборудование / Ю. С. Веселов, И. С. Лавров, Н. И. Рукобратский. – Л., Машиностроение, Ленингр. отд – ние, 1985. – 232 с.
22. Гордин И. В. Оптимизация химико – технологических систем очистки промышленных сточных вод / И. В. Гордин, Н. Б. Манусова, Д. Н. Смирнов. – Л., Химия, 1977. – 176 с.