

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства»
(ПГУАС)

С.Ю. Андреев, М.А. Сафронов, Е.А. Титов

**ФЛОТАЦИОННАЯ ОЧИСТКА
НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ
СТОЧНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
РОТОРНО-ДИСПЕРГИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА**

Пенза 2017

УДК 628.3.034.2(035.3)

ББК 38.761.2

A65

Рецензенты: доктор технических наук, заведующий кафедрой «Транспортные машины» профессор В.В. Салмин (ПГУ);
доктор технических наук, профессор кафедры «Математика и математическое моделирование» И.А. Гарькина (ПГУАС)

Андреев С.Ю.

A65

Флотационная очистка нефтесодержащих производственных сточных вод с использованием роторно-диспергирующего устройства: моногр. / С.Ю. Андреев, М.А. Сафронов, Е.А. Титов. – Пенза: ПГУАС, 2017. – 132 с.

ISBN 978-5-9282-1491-3

Дан обзор существующих технологических и конструктивных решений, применяемых для флотационной очистки производственных сточных вод, содержащих нефтепродукты.

Теоретически обоснован выбор направлений повышения эффективности флотационного метода очистки производственных сточных вод, содержащих нефтепродукты. Представлены результаты экспериментальных исследований технологии получения тонкодисперсной водовоздушной смеси в роторно-диспергирующем устройстве.

Разработана технологическая схема флотационной очистки сточных вод от промывных ванн ОАО «Пензтяжпромарматура» (г. Пенза).

Монография подготовлена на кафедре «Водоснабжение, водоотведение и гидротехника» и предназначена для студентов направления подготовки 08.04.01 «Строительство», аспирантов и инженерно-технических работников.

ISBN 978-5-9282-1491-3

© Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2017

© Андреев С.Ю., Сафронов М.А., Титов Е.А., 2017

ПРЕДИСЛОВИЕ

Среди проблем, связанных с защитой окружающей природной среды, наиболее актуальной является проблема охраны поверхностных водоемов от загрязнений производственными сточными водами. Сброс недостаточно очищенных производственных сточных вод в водоемы приводит как к повышению фоновых значений содержащихся в них органических веществ, так и к увеличению концентраций отдельных токсичных компонентов. Повышение общего уровня загрязнения поверхностных водоемов является основной причиной, обуславливающей ухудшение экологической обстановки. Охрана поверхностных водоемов от загрязнений, поступающих в них с недостаточно очищенными сточными водами, является важнейшей социальной и общественной задачей, входящей в комплекс вопросов глобальной проблемы охраны природы и повышения эффективности использования природных ресурсов.

Одним из наиболее опасных загрязнителей окружающей среды являются производственные сточные воды, содержащие нефтепродукты.

В настоящее время получили широкое распространение флотационные методы очистки производственных сточных вод, содержащих нефтепродукты.

Цель работы заключается в разработке и исследовании новой технологии интенсификации флотационной очистки производственных сточных вод, содержащих нефтепродукты, с использованием роторно-кавитационного устройства.

Монография состоит из пяти разделов.

В первом разделе приведен аналитический обзор литературных источников, в которых рассматриваются технологические и конструктивные решения, применяемые для флотационной очистки производственных сточных вод, содержащих нефтепродукты. Приводится классификация методов флотационной очистки нефтесодержащих производственных сточных вод. Дается описание и анализ технологических схем флотационной очистки с механическим и гидродинамическим диспергированием водовоздушной смеси, рассматривается процесс флотации с подачей воздуха через пористые материалы, анализируются методы электрофлотации, химической флотации, флотации с выделением воздуха из пересыщенного раствора в жидкости.

Второй раздел посвящен теоретическому обоснованию выбора направлений повышения эффективности флотационного метода очистки производственных сточных вод содержащих нефтепродукты. Рассматриваются теоретические основы элементарного акта взаимодействия единичной фло-

тируемой дисперсной частицы с единичным пузырьком воздуха. Описываются стадии процессов сближения дисперсной частицы с пузырьком воздуха и ее закрепления на поверхности пузырька.

В третьем разделе представлены результаты экспериментальных исследований технологии диспергирования водовоздушной смеси в роторно-кавитационном устройстве.

В четвертом разделе даны результаты экспериментальных исследований процессов разделения водовоздушной смеси в поле действия центробежных сил и реагентной флотационной очистки нефтесодержащих сточных вод на напорном гидроциклоне.

В пятом разделе приводятся результаты производственного внедрения предлагаемой технологии реагентной флотационной очистки, которое было осуществлено в процессе строительства и пуска в эксплуатацию локальных очистных сооружений промывочных сточных вод ОАО «Пензтяжпромартатура» производительностью 40 м³/сут.

Авторы выражают признательность рецензентам – зав. кафедрой «Транспортные машины» Пензенского ГУ, д.т.н., проф. В.В. Салмину и д.т.н., проф. кафедры «Математика и математическое моделирование» Пензенского ГУАС И.А. Гарькиной – за высказанные замечания и рекомендации по рукописи монографии.

Авторы будут благодарны читателям за отзывы и пожелания. Просьба направлять их на кафедру ВВГ ПГУАС: 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, ПГУАС.

ВВЕДЕНИЕ

Существенным фактором, влияющим на эффективность процесса флотационной очистки производственных сточных вод, является степень дисперсии используемой в нем водовоздушной смеси, определяемой величиной среднего диаметра пузырьков воздуха.

В отличие от других методов гравитационного выделения загрязнений сточных вод эффективность метода флотационной очистки мало зависит от седиментационных свойств загрязняющих компонентов. Она определяется седиментационными свойствами образующихся флотокомплексов, что значительно повышает эффективность и надежность процесса сепарации загрязнений производственных сточных вод.

Несмотря на значительное количество публикаций, посвященных теоретическим и практическим аспектам процесса флотации, актуальной остается задача получения мелкодисперсных водовоздушных смесей с высоким газосодержанием и их использования в технологиях флотационной очистки сточных вод, содержащих нефтепродукты.

Представленная работа посвящена проблеме разработки и исследования новой технологии получения мелкодисперсной водовоздушной смеси с высоким газонаполнением для интенсификации процесса флотационной очистки производственных сточных вод, содержащих нефтепродукты, что подтверждает ее актуальность.

Предлагаемый в монографии метод положительно отличается от известных аналогов прежде всего технологическими и экономическими характеристиками.

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ФЛОТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ПРОМЫВНЫХ СТОЧНЫХ ВОД, СОДЕРЖАЩИХ НЕФТЕПРОДУКТЫ

1.1. Источники образования, состав и свойства промывных сточных вод предприятий машиностроительного профиля, содержащих нефтепродукты

Технологические процессы предприятий машиностроительного профиля во многом аналогичны. Основными технологическими процессами являются: сборочные, механические, инструментальные, кузнечные, прессовые, литейные, термические, защитных покрытий и окраски.

Количество производственных сточных вод на этих предприятиях колеблется в значительных пределах в зависимости от характера производства и его мощности.

Сточные воды, образующиеся в результате сброса концентрированных отработанных технических растворов, используемых для промывки поверхности деталей, относятся к категории сточных вод, загрязненных кислотами, щелочами, солями тяжелых металлов, нефтепродуктами и поверхностно-активными веществами.

По способу удаления адгезированных на поверхности деталей загрязнений, согласно (рис.1.1), различают: погружной, комбинированный, аэрозольный и струйный методы промывок [43].

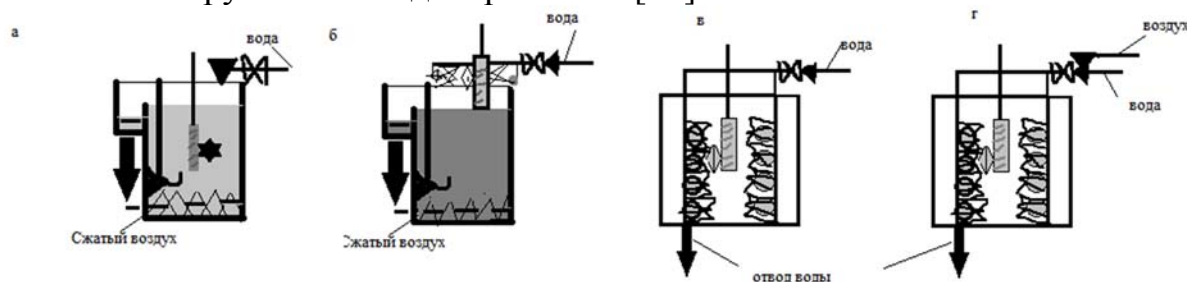


Рис. 1.1. Методы промывки изделий:
а – погружной; б – комбинированный; в – струйный; г – аэрозольный

Погружной метод промывки является наиболее распространенным. По этому методу промывка осуществляется в ваннах с непроточной водой (в ваннах улавливания) и в ваннах с проточной водой. Этот метод применяется при обработке на подвесках деталей, имеющих пазы, углубления и т.п., при обработке деталей насыпью. Минимальная продолжительность выдержки деталей над зеркалом раствора – 20 с.

Струйный метод промывки применяется для изделий простой конфигурации (линейки, листовые изделия, плоские детали), при кратковременной промывке изделий (например, после пассивирования), а также при смыве с

изделий вязких растворов. При этом операции струйной промывки детали предшествует погружная. Струйный метод экономичнее, чем погружной. Это объясняется тем, что при струйной промывке на поверхности деталей происходит не только процесс разбавления выносимого адгезированного поверхностно деталеи раствора, но и процесс удаления и замещения пленки раствора чистой водой в результате гидродинамического воздействия струи.

Комбинированный метод промывки (погружной + струйный) можно применять для изделий сложной конфигурации и для смыва с изделий вязких растворов. Сначала изделия поступают в ванну, заполненную водой, а затем после извлечения из ванны промываются направленными струями воды из дозирующих сеток или из отверстий в горизонтальных трубках, расположенных в верхней части ванны промывки.

По числу ступеней различают промывки одноступенчатые и многоступенчатые.

В промывных сточных водах образуются устойчивые эмульсии прямого типа (нефтепродукты в воде Н/В, содержащие дисперсные частицы (капли) трех типов: грубодисперсные размером 50-300 мкм; средне дисперсные 20-50 мкм и мелкодисперсные с размером капель 0,2-20 мкм [5].

Важным свойством эмульсии нефтепродуктов является поверхностное натяжение на границе двух несмешивающихся жидкостей вода – нефтепродукты. Чем больше величина поверхностного натяжения, тем интенсивнее происходит коалесценция капелек дисперсной фазы, а следовательно расслоение эмульсии.

Коэффициент поверхностного натяжения на границе нефтепродуктов с водой при стандартной температуре в большинстве случаев находится в пределах $\sigma_{н.в} = 0,18 - 0,033$ Дж/м², а на границе с воздухом $\sigma_{н.воз.} = 0,027 - 0,033$ Дж/м² [5].

Коэффициент поверхностного натяжения для границы раздела чистая вода – воздух $\sigma_{в.в.} = 0,073$ Дж/м² [5].

На поверхности эмульсий нефтепродуктов адсорбируются содержащиеся в воде поверхностно-активные вещества (ПАВ), которые могут быть ионогенными, то есть диссоциирующими в водных растворах на ионы, и неионогенными, не несущими электрического заряда. В результате накопления на поверхности раздела фаз молекул ПАВ межмолекулярное взаимодействие в поверхностном слое ослабевает, а поверхностное натяжение уменьшается, что приводит к стабилизации эмульсии. С понижением величины поверхностного натяжения эмульсий нефтепродуктов значительно понижается эффективность их отделения в процессах отстаивания и фильтрования, но существенно увеличивается эффективность их флотационной очистки.

У большинства ПАВ молекулы дифильны – состоят из двух частей: полярной группы и неполярного углеводородного (ароматического) радикала.

Полярная группа гидрофильна, обладает значительным дипольным моментом и имеет большое сродство с водой. Гидрофобный углеродный радикал имеет большое сродство с нефтепродуктами. В эмульгированных нефтепродуктах углеводородные радикалы направлены внутрь капелек эмульсий, а полярные группы – в воду (рис. 1.2).

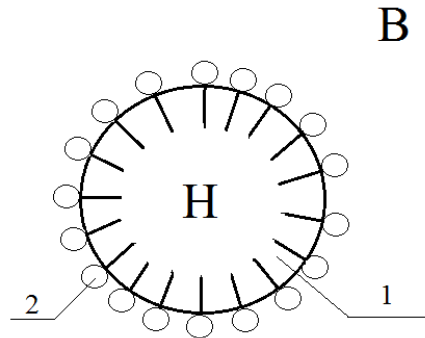


Рис.1.2. Схема стабилизации эмульгированных нефтепродуктов поверхностно-активными веществами (ПАВ):
1 – капельки эмульсии; 2 – молекула ПАВ; Н – нефтепродукты; В – вода

Чем лучше сбалансированы гидрофильные молекулы эмульгатора между фазами эмульсии, тем эффективней его эмульгирующее действие.

В промывных сточных водах наряду с нефтепродуктами содержатся твердые взвешенные частицы (песок, частички металла, гипс, глина и т.п.). Адсорбируясь на поверхности эмульсий нефтепродуктов, они также способствуют их стабилизации. Если взвешенные частички хорошо смачиваются водой, то стабилизирующий слой «брони» образуется со стороны воды. При этом формируется устойчивая эмульсия типа Н/В.

Если частички твердого эмульгатора лучше смачиваются нефтепродуктами, то слой стабилизирующей «брони» образуется с внутренней стороны капелек эмульсии (рис. 1.3).

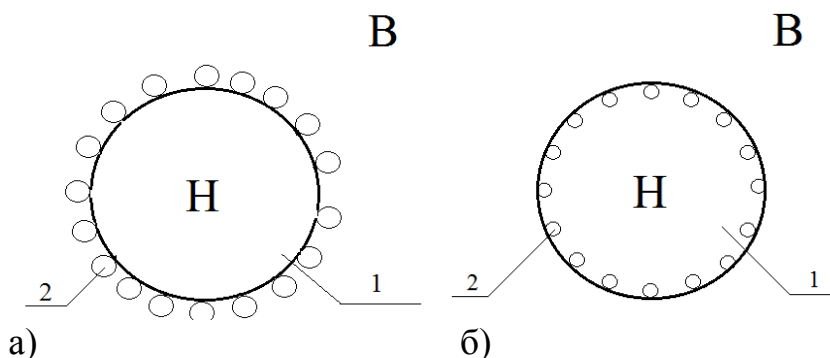


Рис.1.3. Схемы стабилизации эмульгированных нефтепродуктов взвешенными веществами:
а – гидрофильный твердый эмульгатор; б – гидрофобный твердый эмульгатор;
1 – капельки эмульсии; 2 – частички твердого эмульгатора («броня»);
Н – нефтепродукты; В – вода

Таким образом, на устойчивость эмульсии нефтепродуктов существенное влияние оказывают содержащиеся в сточных водах ПАВ и взвешенные

вещества, образующие на поверхности капелек дисперсной фазы защитные «броневые» оболочки, которые препятствуют слипанию этих капелек при их взаимном столкновении в процессе теплового движения или принудительного перемешивания.

Формирование защитной оболочки капельки эмульсии сопровождается утолщением ее слоя и непрерывным увеличением ее механической прочности, происходит «старение» эмульсии нефтепродуктов. Эффект «старения» в начальный период происходит весьма интенсивно, затем постепенно замедляется и часто через сутки прекращается [5].

Наибольшее распространение в практике обезвреживания сточных вод, загрязненных эмульгированными нефтепродуктами, получил метод их флотационной очистки.

1.2. Классификация способов флотационной очистки сточных вод

Большое разнообразие существующих в настоящее время технологий обезвреживания загрязнений производственных сточных вод может быть сведено к двум основным группам методов:

- 1) деструктивные методы очистки, предусматривающие разрушение содержащихся в сточных водах загрязняющих веществ;
- 2) методы сепарации содержащихся в сточных водах загрязняющих веществ, при которых они выделяются из сточных вод в неизменном виде.

Сепарационные методы очистки в отличие от деструктивных методов позволяют извлекать из сточных вод промышленных предприятий содержащиеся в них ценные компоненты с целью их дальнейшей утилизации и повторного использования.

Наибольшее распространение из сепарационных технологий очистки производственных сточных вод получили методы флотации.

Как технологический процесс флотация зародилась более 100 лет назад в обогатительной промышленности, где применялись масляная, пленочная и воздушная (пенная) флотации. Наиболее эффективной и экономичной оказалась воздушная флотация, представляющая собой разновидность метода адсорбционно-пузырьковой сепарации загрязнений сточных вод.

Метод флотации заключается в образовании флотокомплексов «частица – пузырек воздуха», всплывании этих комплексов на поверхность жидкости и удалении с поверхности жидкости образовавшегося пенного слоя.

В основе процессов адсорбционно-пузырькового разделения (частным случаем которого является процесс флотации) лежат явления физико-химического взаимодействия газовой фазы с извлекаемыми веществами. В отличие от других гравитационных разделительных процессов эффективность методов адсорбционно-пузырькового разделения мало зависит от седимен-

тационных свойств загрязняющих веществ (она определяется седиментационными свойствами образующихся флотокомплексов), что значительно расширяет область их применения.

Технологические процессы адсорбционно-пузырькового разделения включают в себя собственно методы флотации и методы пенного фракционирования.

Метод флотации основан на формировании всплывающих флотокомплексов, состоящих из пузырьков воздуха и извлекаемых дисперсных частиц.

В процессе пенного фракционирования на поверхности пузырьков воздуха адсорбируются молекулы загрязняющих веществ [51].

Извлечение дисперсных частиц из жидкости, в которой они находятся во взвешенном или коллоидальном состоянии, происходит в результате прилипания частиц к пузырькам газа (воздуха), образующимся в жидкости или введенным в нее (пенная флотация). Прикрепившиеся к пузырькам воздуха частицы всплывают на поверхность, образуя пенный слой с более высокой концентрацией частиц по сравнению с исходной жидкостью.

Прилипание частицы, находящейся в жидкости, к поверхности газового пузырька возможно только тогда, когда имеет место несмачивание или плохое смачивание частицы данной жидкостью. Смачивающая способность жидкости зависит от ее полярности. С возрастанием полярности способность жидкости смачивать твердые тела уменьшается. Вода смачивает все тела, кроме некоторых «жирных» органических тел, аполярных по своей структуре. Внешним проявлением способности жидкости к смачиванию является величина ее поверхностного натяжения на границе с газом, а также разность полярностей на границе «жидкость – твердое тело». Чем меньше поверхностное натяжение жидкости и разность полярностей, тем лучше тело смачивается ею.

Степень смачивания жидкостью твердой поверхности (при неполном смачивании) может быть выражена количественно величиной краевого угла смачивания Θ , который, как показано на рис. 1.4, принято отсчитывать в сторону жидкой фазы. Этот угол замеряется нанесенной на сухую поверхность каплей воды или пузырьком воздуха, подведенным под помещенную в жидкость поверхность твердого тела.

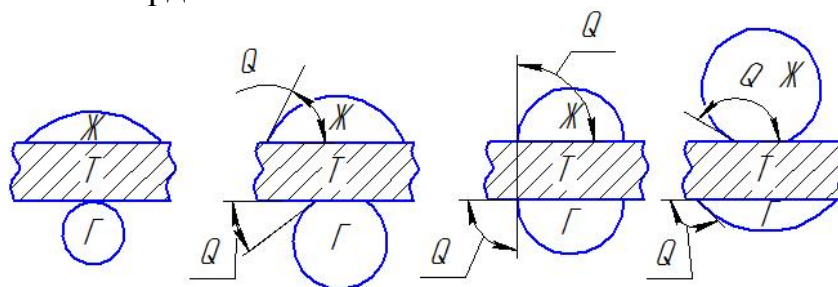


Рис. 1.4 Различные случаи смачивания:
Т – твердое тело; Г – газ; Ж – жидкость; Θ – краевой угол

На степень смачивания (или, иначе говоря, на силу прилипания пузырьков к частицам) оказывает влияние характер взаимодействия между частицей и водой, частицей и растворенным в воде кислородом. Взаимодействие с кислородом может привести к повышению смачиваемости за счет образования окислов, а с диполями воды приводит к образованию гидратной оболочки (толщиной до 0,1 мкм), что также повышает смачиваемость и препятствует закреплению пузырьков. Образование гидратных оболочек возможно в тех случаях, когда энергия связи между самими диполями воды меньше энергии связи между диполями воды и поверхностью твердой частицы. Очень тонкие гидратные оболочки (от 3 до 400 Å) не препятствуют закреплению пузырьков [12, 13].

Таким образом, смачивание определяется свойствами жидкости и зависит от свойств твердого тела. По отношению к воде твердые тела могут быть гидрофобными, гидрофильными или занимать какое-то промежуточное положение. К первым относятся вещества, имеющие аполярное строение молекул и в силу этого неспособные гидратироваться. Такие вещества обладают наименьшей смачиваемостью и поэтому легко флотируются. Чем меньше гидратирована частица, тем легче разрывается гидратная оболочка при приближении частицы к пузырьку газа (воздуха), и частица прилипает к пузырьку, поскольку такое состояние соответствует минимуму свободной энергии системы.

Следует отметить, что флотируемость зависит также и от характера частиц. Например, гидрофильные гидроокиси металлов имеют очень малый краевой угол смачивания. Однако они образуют хлопья, в которые проникают пузырьки газа, в результате чего оказывается возможной их флотация с высокой эффективностью без применения специальных реагентов-собирателей [103].

Прилипание загрязнений к пузырькам происходит двумя путями: при столкновении частицы с пузырьком и при возникновении пузырька из раствора на поверхности частицы.

На основании термодинамического и кинетического анализов процессов прилипания [103] можно сделать выводы, что чем гидрофобнее поверхность частички, тем вероятнее ее прилипание к воздушному пузырьку при их столкновении; сила столкновения и время контакта могут быть тем меньше, чем гидрофобнее частица и чем гидрофобнее ее поверхность, тем вероятнее образование на ней пузырьков газов, выделяющихся из раствора.

Таким образом, кинетику флотационного процесса характеризуют следующие факторы:

- сила прилипания пузырька к частице, определяемая величиной краевого угла смачивания и размерами пузырька;
- кинетика разрыва промежуточной жидкой прослойки, приводящая к образованию тонкой пленки, отличной по своим свойствам от жидкости в объеме;

- размер частиц;
- сорбция газов на поверхности частиц и химическое взаимодействие газов (в частности, кислорода) с частицами;
- изменение величины краевого угла с течением времени;
- условия зарождения и образования пузырьков на границе раздела жидкость – твердое тело за счет выделения растворенных газов.

Флотационные установки могут состоять из одного или двух отделений (камер). В однокамерных установках в одном и том же отделении происходят одновременно насыщение жидкости пузырьками воздуха и всплывание флотирующихся загрязнений. В двухкамерных установках, состоящих из приемного и отстойного отделений, в первом отделении происходит образование пузырьков воздуха и агрегатов «пузырек – частица», а во втором – всплывание шлама (пены) и осветление жидкости [146].

Традиционно принято классифицировать флотационные установки и сооружения по способу получения водовоздушной смеси. Все существующие способы можно разделить на две основные группы:

- подача газовой фазы и дробление ее (диспергирование) в объеме жидкости;
- непосредственное выделение газа из обрабатываемой воды.

Классификация флотационных установок и сооружений приведена на рис.1.5.

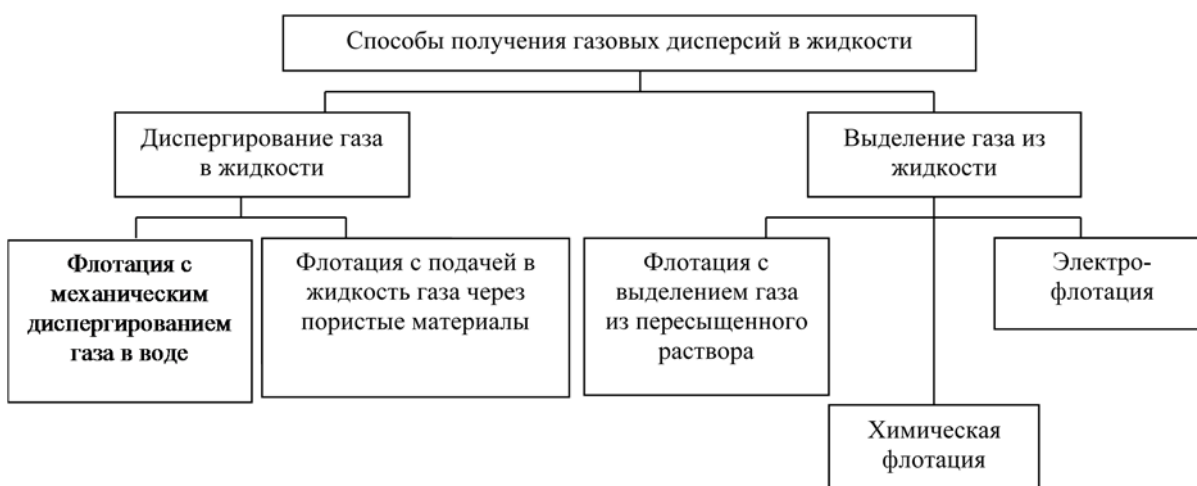


Рис.1.5. Классификация флотационных установок и сооружений по способу получения водовоздушной смеси

Показатели водовоздушной смеси, получаемой разными способами, существенно различаются как по количеству диспергированного газа, так и по фракционному составу газовых пузырьков. В общем случае при дроблении газа, подаваемого в воду извне, возможно получение весьма больших значений показателя газонаполнения. При этом объем воды в области работы диспергатора интенсивно перемешивается. Водовоздушная смесь, образующаяся при выделении воздуха из водного раствора, характеризуется большей

дисперсностью, но значительно меньшим удельным объемом газовой фазы. Эти различия непосредственно определяют тип формирующихся флотокомплексов и ход флотационного процесса в целом [8].

1.3. Флотация с механическим диспергированием воздуха

При механическом диспергировании газовой фазы в воде обрабатываемая воздушная смесь подвергается процессу интенсивного перемешивания. Степень дисперсности пузырьков воздуха будет тем выше, чем интенсивнее будет происходить относительное перемещение газовой и жидкой фаз и чем меньше величина поверхностного натяжения на границе раздела фаз «воздух – вода» [67].

Перемещение газовой фазы (пузырька воздуха) относительно жидкой фазы (воды) происходит под действием турбулентных пульсаций скорости движения потока водовоздушной смеси, образующихся в процессе перемешивания.

Различают следующие способы механического диспергирования воздуха в воде:

- 1) диспергирование воздуха в воде вращающимся импеллером;
- 2) гидродинамическое диспергирование воздуха в воде.

1.3.1. Диспергирование воздуха в воде вращающимся импеллером

Для механического диспергирования газовой фазы используют различного вида устройства, движущиеся части которых попеременно соприкасаются с жидкой и газовой фазами, – импеллеры. Часто комбинируют истечение газов в виде пузырей с последующим их дополнительным диспергированием турбинкой. При этом газовая фаза дробится после истечения из барботера, расположенного ниже мешалки, либо газ поступает непосредственно в мешалку, снабженную отверстиями или каналами. Энергичное перемешивание сточной воды в импеллерных флотационных установках создает большое количество мелких вихревых потоков, что позволяет получить пузырьки достаточно малой величины. Устройство импеллерного диспергатора показано на рис. 1.6. Оно включает воздухопадающую трубу, в которой размещается вращающийся вал, соединяющий привод с ротором, статор и спрямляющую решетку. Воздух, засасываемый ротором, поступает к нему по воздухопадающей трубе сверху. Иногда для подачи воздуха используют полый вал привода. Над ротором расположен неподвижный диск с отверстиями для внутренней циркуляции воды – статор. Смесь воды и воздуха выбрасывается импеллером через статор. Спрямляющая решетка, расположенная вокруг статора, способствует более мелкому диспергированию воздуха в воде и уменьшению скорости выхода водовоздушной смеси в камеру флотации.

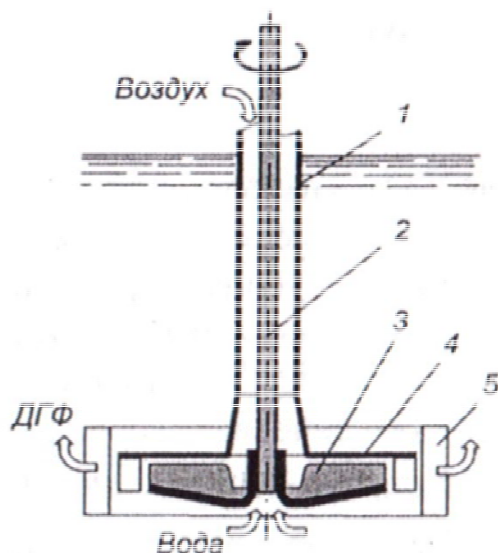


Рис.1.6. Гидромеханический импеллерный диспергатор:
 1 – воздухопадающая труба; 2 – вал привода ротора; 3 – ротор;
 4 – статор; 5 – спрямляющая решетка

Механизм процесса диспергирования пузырьков при механических воздействиях достаточно сложен. Он включает стадии деформирования пузырьков под влиянием касательных или растягивающих напряжений и последующего их дробления. Размер частиц и количество газовой дисперсии зависят от окружной скорости вращения импеллера, которую принимают 10-15 м/с, размера и формы лопаток ротора, глубины погружения диспергатора, содержания ПАВ, температуры и многих других факторов. Увеличению дисперсности газовой эмульсии способствует уменьшение межфазного поверхностного натяжения, при этом также уменьшается удельная работа диспергирования.

Согласно исследованиям [104], удельное количество диспергируемого воздуха может быть найдено по формуле

$$q_{\phi} = 0.85 \sqrt{\frac{H_{\text{макс}} + H_{\text{ст}}}{H + H_{\text{ст}}} - 1}; \quad (1.1)$$

здесь

$$H_{\text{макс}} = \frac{\zeta V_R^2}{g}, \quad (1.2)$$

где $H_{\text{макс}}$ – наибольшее давление, развиваемое крыльчаткой ротора, м; H – давление, создаваемое крыльчаткой в статоре, м; $H_{\text{ст}}$ – глубина погружения статора, м; ζ – коэффициент, учитывающий ударное вхождение жидкости в импеллер, принимаемый в пределах 0,5...0,9; V_R – линейная скорость вращения крыльчатки ротора, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с².

Применение импеллерных установок целесообразно при очистке сточной жидкости с высокой концентрацией (выше 2000-3000 мг/л) нерастворенных загрязнений, т.е. когда для их флотирования требуется высокая степень насыщения воздухом сточной жидкости (0,1-0,5 объема воздуха на 1 объем воды).

1.3.2. Гидродинамическое диспергирование воздуха в воде

Гидродинамическое получение газовой дисперсии в воде основано на взаимодействии потоков жидкости и газа при значительной разнице в их скоростях. Оно происходит вследствие вовлечения газа в поток жидкости, обладающей большей кинетической энергией. По принципу действия различают устройства с внешним взаимодействием фаз – струйные, с внутренним взаимодействием фаз – эжекционные и пневмогидравлические, в которых жидкая и газовая фазы подаются под давлением.

Струйное диспергирование воздуха осуществляется в результате вхождения в открытую поверхность жидкости свободной струи, направленной через насадок с высокой скоростью (рис.1.7).

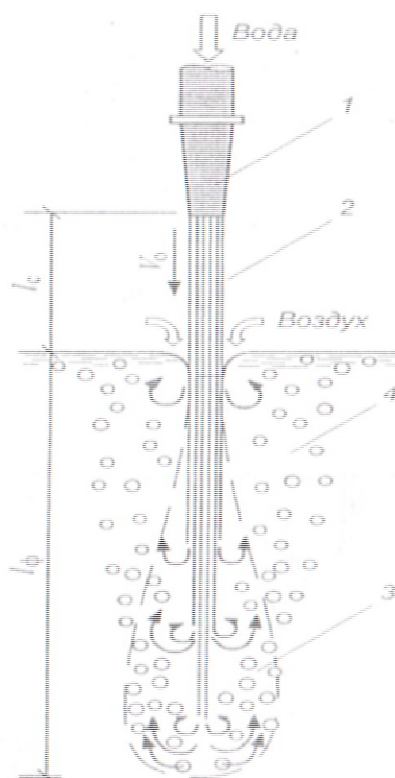


Рис.1.7. Схема работы струйного диспергатора:

- 1 – насадок; 2 – компактная струя воды;
- 3 – факел нисходящей газовой дисперсии; 4 – восходящая водовоздушная смесь

Исследования струйных аэраторов показали, что эффективность диспергирования зависит от скорости и высоты падения струи жидкости. По

данным [8], количество вовлекаемого газа, оцениваемое его удельным расходом, может быть найдено по следующим формулам:

$$q_y = 1.56 \cdot 10^{-6} \left(\text{Re} \sqrt{Fr} \right)^{0.75} \left(\frac{l_c}{R_o} \right)^{0.75}; \quad (1.3)$$

здесь

$$q_\phi = \frac{Q_\Gamma}{Q_{\text{ж}}}; \quad R_e = \frac{V_o R_o}{\nu}; \quad Fr = \frac{V_o^2}{g R_o} \quad (1.4)$$

где q_y – удельный расход газа, $\text{м}^3/\text{м}^3$; Q_Γ и $Q_{\text{ж}}$ – объемные расходы газа и жидкости, м^3 ; R_e и Fr – критерии Рейнольдса и Фруда; l_c – высота падения струи, м; R_o – гидравлический радиус насадка, м; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; V_o – скорость истечения жидкости через насадок, $\text{м}/\text{с}$; ν – кинематическая вязкость жидкости, $\text{м}^2/\text{с}$.

Теоретически величина удельного расхода газа при струйном диспергировании под давлением 0,4-0,5 МПа может достигать $10 \text{ м}^3/\text{м}^3$ и более. Однако при рациональных затратах энергии его величина составляет 2-3 $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Глубина проникновения факела водовоздушной смеси (l_ϕ) возрастает с увеличением кинетической энергии падающей струи:

$$l_\phi = 15,5 R_o \sqrt[3]{Fr}. \quad (1.5)$$

Увеличение скорости входа струи в жидкость уменьшает размер пузырьков образующейся газовой дисперсии [8].

Эжекционное диспергирование, как и струйное, основано на дроблении газовой фазы при взаимодействии с турбулизованной струей жидкости, но осуществляемом в стесненных условиях (рис.1.8).

Показатель эжекции газа, равный удельному расходу (q_y), в зависимости от особенностей конструктивного исполнения диспергатора может изменяться от 1 до 5. Его величину, по данным Е.Я. Соколова и Н.М. Зингера, с достаточной точностью можно определить по выражению

$$q_y = 0.85 \sqrt{\Delta P_c / P_s} - 1, \quad (1.6)$$

где ΔP_c и ΔP_s – разность давлений соответственно в сопле и эжекторе, Па.

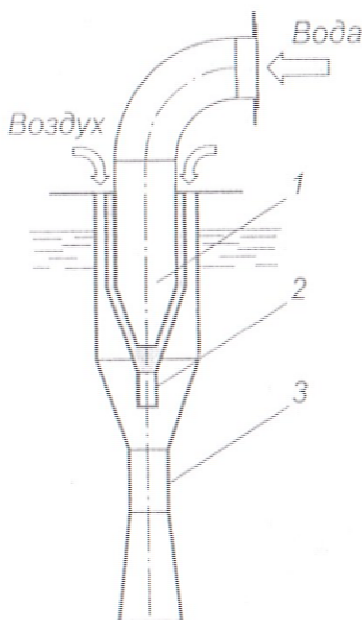


Рис.1.8. Струйный диспергатор со ступенчатой эжекцией воздуха:
1 – сопло; 2 – насадок;
3 – смесительная камера

Практика применения эжекционных диспергаторов показала, что наилучший эффект диспергирования ($q_y = 2-3 \text{ м}^3/\text{м}^3$) достигается при скорости истечения жидкости через сопло 12-18 м/с.

Пневмогидравлический способ получения газовой дисперсии отличается от эжекционного тем, что жидкая и газовая фазы поступают в смесительную камеру под давлением. Причем объемное соотношение фаз регулируется соответствующей подачей жидкости и газа. Схема пневмогидравлического диспергатора приведена на рис.1.9.

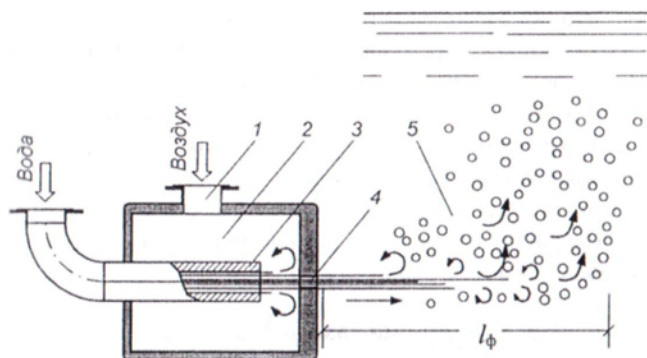


Рис. 1.9. Пневмогидравлический диспергатор с горизонтальной осью потока: 1 – смесительная камера; 2 – патрубок подачи жидкости; 3 – патрубок для подвода газа; 4 – выходное отверстие; 5 – газонаполненный факел

По данным исследований, отношение диаметров сечений патрубка для подвода жидкости и выходного отверстия изменяется от 5 до 10. Оптимальным значением этого отношения можно считать 5. При этом соотношении достигается наилучшая газонаполненность факела водовоздушной смеси q_y и оптимальный фракционный состав газовой дисперсии.

Так, при подаче жидкости и воздуха в смесительную камеру под давлением 0,3 МПа газонаполненность факела изменяется от 0,3 до 0,75, в зависимости от отношения диаметров. Длина газонаполненного факела составляет 0,3 м. Средний диаметр пузырьков водовоздушной смеси, полученной пневмогидравлическим способом, изменяется в интервале от 0,75 до 2,75 мм. Для осуществления этого способа диспергирования газовой фазы необходима установка циркуляционных насосов и компрессоров.

Средний размер пузырьков водовоздушной смеси, получаемой гидродинамическим и пневмогидравлическим способами, находится в интервале от 1 до 4 мм, что обуславливает недостаточную эффективность флотационного удаления нефтепродуктов [8].

1.4. Флотация с подачей воздуха в воду через пористые материалы

Метод флотации с подачей воздуха через пористые материалы отличается простотой аппаратного оформления процесса и относительно малыми расходами энергии.

Воздух во флотационную камеру подается через мелкопористые фильтровые пластины, трубы, насадки, уложенные на дне камеры. Величина отверстий должна быть 4–20 мкм, давление воздуха 0,1–0,2 МПа, продолжительность флотации 20–30 мин, расход воздуха определяется экспериментально. Рабочий уровень обрабатываемой сточной воды во флотации 1,2–2 м. Недостатком этого метода является возможность зарастания и засорения пор, а также трудность подбора мелкопористых материалов, обеспечивающих выход мелких, близких по размерам пузырьков воздуха.

Очистка небольших количеств сточной жидкости этим способом может быть произведена на установках рис.1.10, близких по конструкции к аппарату, предложенному инженером Н.А. Гребневым [8].

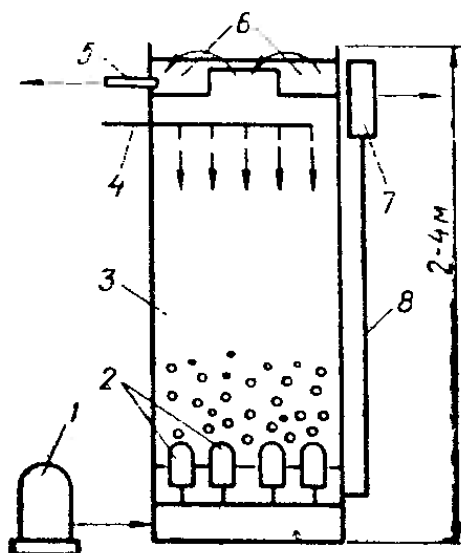


Рис.1.10. Схема флотационной установки конструкции Н.А. Гребнева: 1 – компрессор; 2 – пористые колпачки; 3 – флотационная камера; 4 – подача загрязненной жидкости; 5 – шламоотводящая труба; 6 – желоб для сбора шлама; 7 – регулятор уровня; 8 – трубопровод очищенной жидкости

Сточная жидкость по трубопроводу подается в верхнюю часть вертикально установленного цилиндра высотой 2–4 м, в нижней устраивается поддон, под который закачивается воздух от компрессора. На поддоне крепятся керамические колпачки с отверстиями, через них сжатый воздух поступает в сточную жидкость, флотируя загрязнения. Осветленная вода забирается из нижней части цилиндра и через регулятор уровня отводится с установки, а пена переливается в кольцевой желоб и по трубе удаляется из него.

Как видно из приведенной схемы, в этом аппарате использован принцип противотока, то есть встречного движения жидкости и пузырьков воздуха. Очистка на таких установках может производиться как в одну, так и в две и более ступени.

Конструкция установки с диспергированием воздуха через пористые материалы для очистки больших количеств сточной жидкости представляет собой резервуар с горизонтальным движением воды (рис. 1.11).

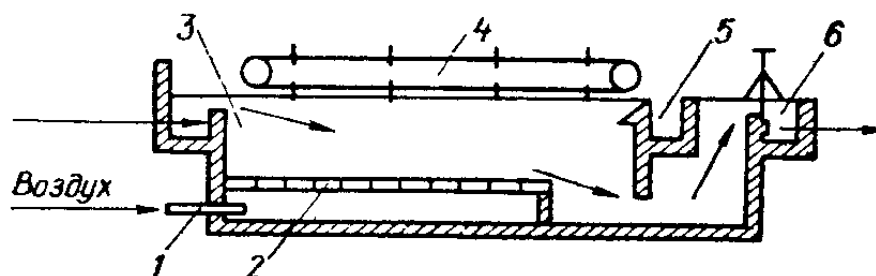


Рис. 1.11. Флотационная установка с диспергированием воздуха через мелкопористые фильтровые пластины:
1-трубопровод подачи воздуха; 2 – фильтровые пластины;
3 – флотационная камера; 4 – скребок; 5 – шламоприемник;
6 – регулятор уровня воды на выпуске

Воздух во флотационную камеру подается через мелкопористые фильтры, уложенные на дне. Сточная жидкость поступает в приемную часть флотационной камеры и отводится из нижней части через регулятор уровня. Пена скребковым транспортером собирается в отводящий желоб.

По опытным данным, относящимся к обработке сточных вод, содержащих отходы смол и нефти, величина отверстий должна быть в среднем от 4 до 20 мкм, давление воздуха – 1-2 атм, расход воздуха – 40-70 м³/м² или 0,24-0,31 м³/м³, продолжительность флотации – не менее 20-30 мин, рабочий уровень до флотации – 1,5-2 м, уровень воды во время флотации повышается в зависимости от давления (расхода) воздуха на величину от 6 до 56%.

Размеры пузырьков воздуха, образующихся на поверхности мелкопористого воздухораспределительного устройства, зависят от среднего размера пор, расхода воздуха и скорости его выхода из пор, а также величины коэффициента поверхностного натяжения на границе раздела фаз «вода – воздух».

На рис. 1.12 изображен поперечный разрез пузырька воздуха диаметром d_{II} в момент отрыва его от одиночной поры диаметром d_0 .

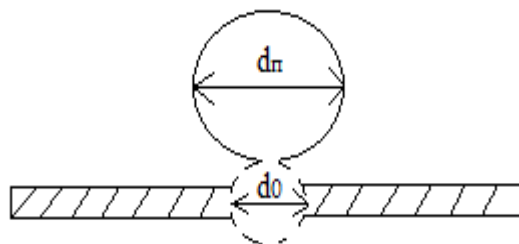


Рис. 1.12. Поперечный разрез пузырька воздуха диаметром d_{II} в момент отрыва от одиночной поры диаметром d_0

При малых скоростях истечения воздуха из отверстия гидродинамическим сопротивлением росту пузырька воздуха можно пренебречь и записать баланс сил, действующих на него в момент отрыва:

$$F_{ар} = F_{пн},$$

где $F_{ар}$ – сила Архимеда (Н); $F_{AP} = W_n g (\rho - \rho_l) = \frac{\pi d_n^3}{6} g (\rho - \rho_l)$ (W_n – объем пузырька воздуха (м^3); g – ускорение свободного падения ($\text{м}/\text{с}^2$); ρ и ρ_l – соответственно плотность воды и плотность воздуха ($\text{кг}/\text{м}^3$); d_n – диаметр пузырька воздуха, м):

$$F_{пн} = \pi \varphi_0 d_0 \sigma_0$$

$F_{пн}$ – сила поверхностного натяжения на шейке пузырька в момент отрыва (Н); φ_0 – коэффициент, учитывающий сужение диаметра шейки пузырька воздуха перед началом процесса его отрыва; d_0 – диаметр поры (м); σ_0 – коэффициент поверхностного натяжения границы раздела «воздух – вода» (Н/М).

Тогда

$$\frac{\pi d_n^3}{6} g (\rho - \rho_l) = \pi \varphi_0 d_0 \sigma_0,$$

откуда

$$d_n = \sqrt[3]{\frac{6 \varphi_0 d_0 \sigma_0}{g (\rho - \rho_l) \pi}}. \quad (1.7)$$

Формула (1.7) удовлетворительно описывает эксперимент при значении коэффициента $\varphi_0 = \frac{2}{3}$

При $d_0 = 20 \cdot 10^{-6}$ м; $\sigma_0 = 0,072$ Н/м; $\rho = 998,2$ $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_l = 1,2$ $\text{кг}/\text{м}^3$; $\sigma_0 = 0,073$ Н/м; $g = 9,8$ $\text{м}/\text{с}^2$ диаметр образующегося пузырька воздуха будет равен:

$$d_n = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot \frac{2}{3} \cdot (20 \cdot 10^{-6}) \cdot 0,073}{9,8(998,2 - 1,2) \cdot 3,14}} = 0,84 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

В реальных условиях механизм истечения газа из одиночной поры даже при умеренных скоростях, когда над порой формируется отдельный пузырек, значительно сложнее.

Как правило, необходимо учитывать влияние гидродинамического сопротивления роста пузырька на поре и возникающие при этом эффекты, связанные со сжимаемостью воздуха и приводящие к значительному увеличению диаметра образующегося пузырька.

В работе [104] описываются исследования диспергатора воздуха, состоящего из пористой пластины толщиной 3 мм с размерами пор 5-70 мкм при скорости выхода $v_b=0,028-22,6$ м/с. Скорость выхода воздуха определялась в пересчете на полное сечение колонны $d_k = 150$ мм при высоте слоя жидкости 400 мм и температуре воды 20 °С. Было установлено, что при малых расходах воздуха получается смесь маленьких устойчивых пузырьков диаметром 4-6 мм. Другого размера пузырьков получить не удалось. Испытывалась также в качестве диспергатора воздуха пластина с диаметром отверстий 4-6 мм. Была получена явная зависимость размеров пузырьков воздуха от расхода воздуха через пластину. Скорость истечения принималась в пересчете на полное сечение колонны и изменялась в интервале $v_b = 0,041-24,6$ см/с (суммарная площадь отверстий пластины составляла 0,041-1,48 % от площади сечения колонны).

Были выявлены два характерных режима образования пузырьков:

1) при малых скоростях движения воздуха в единичной поре размеры образующихся пузырьков почти одинаковы и зависят от диаметра отверстий $d_{no} = f(d_0^{1/3})$;

2) при увеличении скорости движения воздуха в единичной поре выше определенного предела размер пузырьков становится произвольным и наблюдаются как мелкие, так и крупные пузырьки воздуха.

В зависимости от расхода воздуха, подаваемого на пористое воздухо-распределительное устройство, различают следующие виды режима флотации: пузырьковый; факельный; струйный.

Пузырьковый режим наблюдается при низких и умеренных расходах воздуха и характеризуется четкой зависимостью размеров образующихся пузырьков от размеров пор или отверстий.

Если расход воздуха через единичную пору (отверстие) задает скорость роста диаметра образующегося пузырька воздуха, превышающую скорость всплывания образовавшегося перед этим пузырька, то происходит их слияние и над отверстием образуется факел воздуха. Воздушный факел на некотором расстоянии от отверстия распадается, в результате чего образуется смесь крупных и мелких пузырьков воздуха. При факельном режиме истечения газа в жидкость крупность образующихся пузырьков уже не зависит от размеров пор. Она определяется гидродинамическим режимом истечения газа в жидкость. Увеличение расхода воздуха приводит к увеличению длины образующегося газового факела, и при некоторой критической величине расхода воздуха длина факела становится равной глубине слоя жидко-

сти, факельный режим аэрации переходит в струйный. Границы барботажных режимов ориентировочно определяются следующими удельными нагрузками по воздуху на фильтросную пластину [17]: 1) пузырьковый режим $J \leq 25 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; 2) факельный режим $25 \leq J \leq 100 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; 3) струйный режим $J > 100 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Указанные пределы существенно зависят от пористости диспергирующей пластины ε_n (отношение суммарной площади отверстий к площади поверхности диспергирующей пластины).

Установлено, что при достижении некоторой величины расхода воздуха, пропускаемого через диспергирующий элемент, частота образования пузырьков становится постоянной (20-40 с^{-1}) и при увеличении подачи воздуха не изменяется. Образовавшийся на поверхности диспергирующей пластины пузырек воздуха, как правило, имеет сферическую форму [17].

Газонаполнение (φ) в барботажных камерах флотации определяется теоретически по уравнению, имеющему достаточно высокую сходимость с результатами, получаемыми экспериментально:

$$\varphi = \frac{Q_{\Gamma}}{v_{\Pi}}, \quad (1.8)$$

где Q_{Γ} – скорость потока газа через горизонтальное сечение флотокамеры, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; v_{Π} – средняя скорость коллективного всплывания пузырьков воздуха, $\text{м}/\text{с}$.

Максимальное газонаполнение в барботажных флотаторах может достигать 0,5 и более. Однако в реальных очистных сооружениях его величина не превышает 0,06-0,2.

1.5. Электрофлотация

В процессе электрофлотации через обрабатываемые сточные воды пропускается постоянный электрический ток, в результате чего происходит их насыщение пузырьками газа, выделяющегося при электролизе воды.

Прохождение электрического тока через сточную жидкость, являющуюся зачастую многокомпонентным раствором-электролитом, изменяет химический состав жидкости, свойства и состояние нерастворенных примесей.

В сточной жидкости при прохождении ее через межэлектродное пространство происходят такие процессы, как электролиз, поляризация частиц, электрофорез, окислительно-восстановительные реакции. Интенсивность указанных процессов зависит, во-первых, от химического состава жидкости, во-вторых, от материала электродов, которые могут быть растворимыми или нерастворимыми, в-третьих, от плотности на электродах электрического тока и напряжения.

В процессе электролиза воды при $\text{pH} < 7$ происходит разряд ионов гидроксония на катоде с образованием атомарного водорода, адсорбированного на его поверхности.



В нейтральной и щелочной среде наблюдается разряд молекул воды



На аноде соответственно происходит разряд гидроксильных ионов в щелочной среде и молекул воды в нейтральной и кислой среде



Поскольку равновесные потенциалы водорода и кислорода находятся в одинаковой зависимости от величины pH , теоретическое напряжение разложения воды не зависит от активной реакции среды. Однако оно зависит от температуры обрабатываемой воды.

Практика применения электролиза воды в разных областях техники, в том числе и в технологии очистки воды, показывает, что реальное падение напряжения на электродных пакетах установок значительно превосходит теоретическую величину потенциала разложения воды.

Выбор материалов для изготовления анодов весьма ограничен. Это обусловлено тем, что в процессе флотации электрода металл растворяется, чего в процессе флотации не допускается. Кроме того, выделяющийся на поверхности электрода кислород вызывает его химическое разрушение. Этому способствует также кислая среда анолита.

Наряду с выделением кислорода при достаточном количестве в обрабатываемой воде хлоридов происходит анодное образование хлора по схеме



Поскольку потенциал выделения хлора $\text{Cl} = +1,36$ В значительно выше потенциала разложения воды, следовало предположить, что на аноде должен выделяться только кислород. В то же время влияние величины анодного перенапряжения выделения веществ оказывается весьма существенным.

Опыт эксплуатации показывает, что при длительной работе электродного пакета разряд ионов идет не на чистой поверхности анода, а на окисной пленке. Это обуславливает некоторый рост перенапряжения выделения кислорода, который обычно составляет 0,15-0,18 В, чего вполне достаточно для достижения потенциала выделения хлора.

Соотношение выходов реакций выделения кислорода и хлора зависит от конкретных значений pH , температуры, перенапряжения на анодных материалах и соответствующих плотностей токов, ионного состава сточных вод.

При небольшой производительности (до 10-15 м³/ч) электрофлотационные установки могут быть однокамерными рис.1.13.

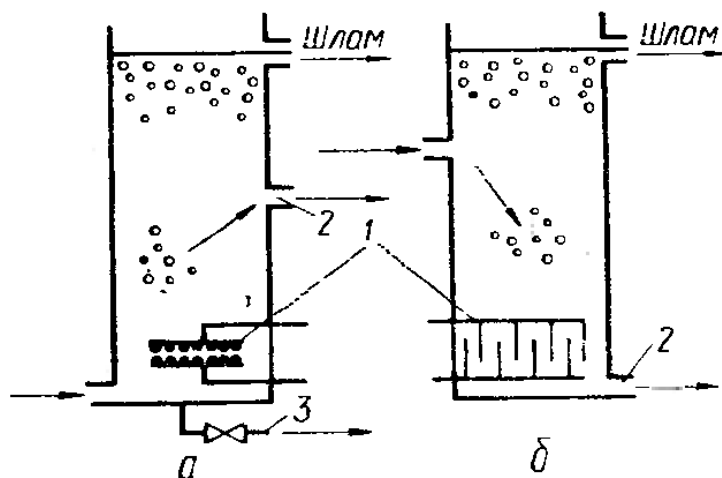


Рис.1.13. Схемы однокамерных электрофлотационных установок: а – прямого потока; б – противоточная; 1 – электродные системы; 2 – выпуск очищенной воды; 3 – выпуск осадка

По схеме, приведенной на рис.1.13(а), загрязненная вода подается в нижнюю часть флотационной камеры, проходит между электродами и отводится из середины камеры на последующие ступени очистки. В схеме на рис.1.13, б, использован принцип противотока – неочищенная жидкость движется сверху вниз навстречу всплывающим пузырькам газа, вода отводится из нижней части камеры. Если в сточной жидкости мало нефлотирующих легкооседающих частиц, эффект осветления по этой схеме будет достаточно высоким.

Электрофлотационные установки большей производительности рекомендуется устраивать двухкамерными. Двухкамерные установки горизонтального и вертикального типов, изображенные на рис.1.14 и 1.15, состоят из электродного отделения и отстойной части. Сточная жидкость поступает в успокоитель, который отделен от электродного отделения решеткой. Проходя через межэлектродное пространство, она насыщается пузырьками газа, подвергается воздействию электрического тока, способствующего коагуляции загрязнений, или обогащается гидроокисями – коагулянтами (при растворимых электродах). Всплывание частиц происходит в отстойной части. Всплывший шлам сгребается скребками в шламоотводящий лоток. Предусмотрено также удаление осадка, который может выпасть на дно.

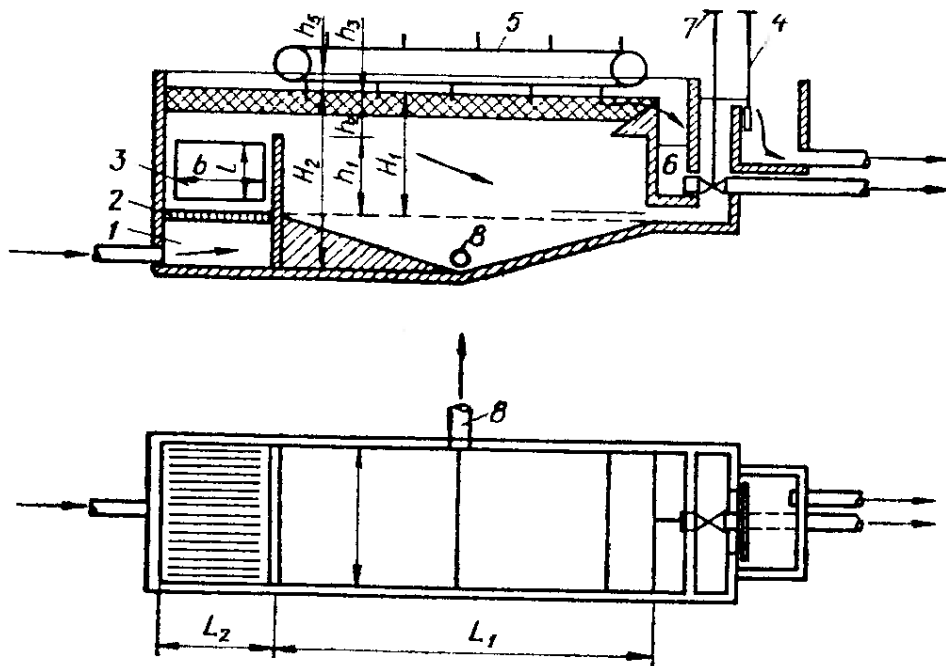


Рис.1.14. Схема горизонтального электрофлотатора:
 1 – впускная камера; 2 – решетка-успокоитель; 3 – электродная система;
 4 – регулятор уровня на выпуске воды; 5 – скребки; 6 – шламоприемник;
 7 – регулятор отвода шлама; 8 – выпуск осадка

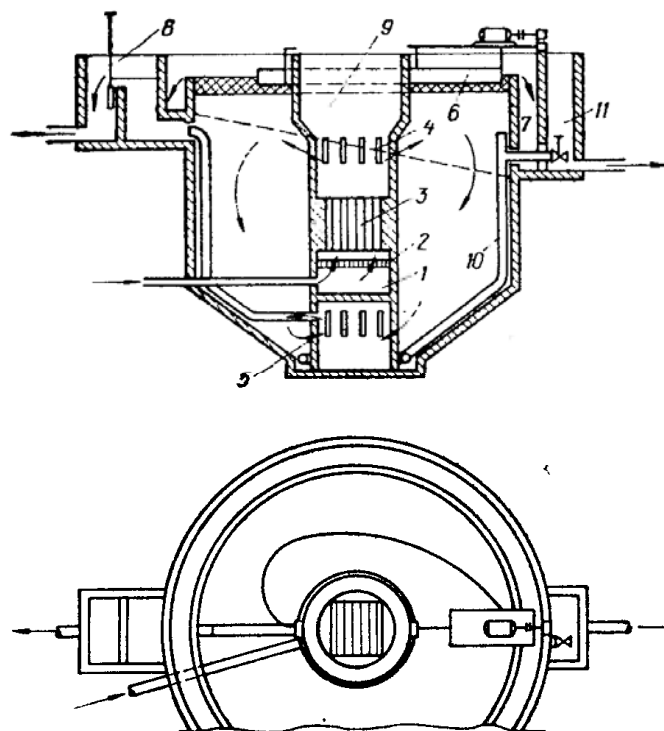
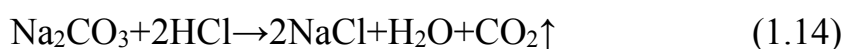


Рис.1.15. Схема вертикального электрофлотатора:
 1 – впускная камера; 2 – решетка-успокоитель; 3 – электродная система;
 4 – щели для впуска воды во флотационную часть; 5 – щели для сбора
 осветленной воды; 6 – спиральный скребок; 7 – шламоотводящий кольцевой
 желоб; 8 – регулятор уровня воды на выпуске; 9 – монтажный колодец;
 10 – трубопровод выпуска осадка; 11 – камера выпуска осадка и шлама

1.6. Химическая флотация

При протекании в очищаемой воде химических, биохимических и электрохимических реакций, сопровождающихся образованием газов (кислорода, углекислого газа, хлора и др.), получают пересыщенные газовые растворы, из которых выделяются пузырьки. В начальный период реакции проходит некоторый промежуток времени до возникновения состояния предельного насыщения жидкой фазы газовым компонентом. Далее динамика пересыщения может быть различной.

При проведении реакции в жидкой фазе степень насыщения быстро увеличивается, достигает максимума, а затем по мере образования пузырьков и их роста снова уменьшается. Примером этого может служить взаимодействие растворов карбонатов с растворами кислот при их быстром смешении.



Если в реакции используют твердые исходные продукты, то газ выделяется преимущественно на их поверхности. Реакции с использованием твердых веществ являются саморегулирующимися, так как возникающая газовая фаза уменьшает доступ жидкого реагента в зону реакции до установления состояния подвижного равновесия.

При некоторых условиях пузырьки образовавшихся газов могут прилипать к нерастворенным загрязнениям и выносить их в пенный слой.

Такое явление с довольно высоким эффектом осветления и хорошим уплотнением всплывающего осадка наблюдается при обработке сточных вод заводов синтетических продуктов хлорной известью с одновременным введением коагулянтов, а также при добавлении глинозема и серной кислоты в сточные воды фабрик первичной обработки шерсти. Принципиальная схема флотационной камеры, предназначенной для химической флотации, представлена на рис. 1.16.

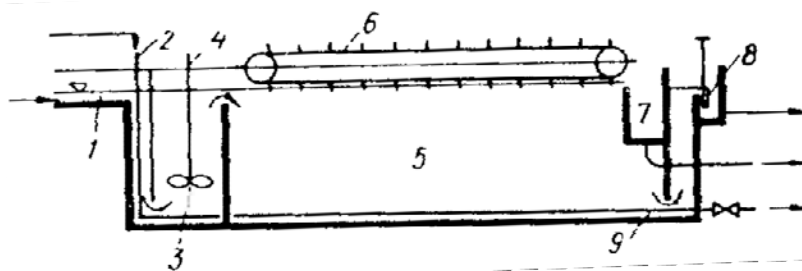


Рис. 1.16. Схема установки для химической флотации:

- 1 – подводный канал; 2 – трубопровод подачи реагентов; 3 – камера реакции;
- 4 – мешалка; 4 – мешалка; 5 – флотационное отделение; 6 – скребки;
- 7 – шламодриемник с выпуском шлама; 8 – регулятор уровня воды на выпуск;
- 9 – труба для сбора и удаления осадка

Сточные воды поступают в смеситель-реактор, куда по трубопроводу подаются и необходимые реагенты; во избежание преждевременной дегазации стоков время их пребывания в камере реакции следует принимать минимальным (3–5 мин).

Перемешивание можно производить мешалкой механического типа. Насыщенная пузырьками выделившегося газа сточная жидкость поступает во флотационную камеру, где твердая фаза выделяется в пенный слой, который непрерывно или периодически сгребается скребковым транспортером в шламоотводящий лоток. Осветленная вода уходит из камеры через водослив с регулируемой высотой кромки. На дне флотационной камеры располагается грязевая труба для выпуска осадка, выпадающего на дно. При значительном количестве осадка в днище камеры могут быть устроены приемки с выпуском осадка из них.

1.7. Флотация с выделением воздуха из пересыщенного раствора

Флотация с выделением воздуха из раствора осуществляется пузырьками, образующимися в жидкости при изменении условий растворимости, главным образом при изменении давления. Как известно, растворимость газов в жидкости зависит от их физических свойств, давления, температуры и для сравнительно небольших давлений (до 2–3 МПа) выражается законом Генри, который гласит, что растворенное в жидкости количество газа пропорционально его парциальному давлению над раствором.

При создании пересыщенного раствора газа в воде избыточное его количество выделяется из раствора в виде пузырьков в объеме жидкости или на поверхности частиц примесей, если они обладают достаточной гидрофобностью. Причем в термодинамическом отношении пузырьку легче выделиться на поверхности какого-либо тела, чем в объеме жидкости. Размеры выделяющихся пузырьков зависят от многих факторов и находятся в пределах от нескольких единиц микрометров до 100–200 мкм, т. е. они в десятки и сотни раз меньше пузырьков, образующихся в механических и пневматических флотационных установках.

Флотация с выделением воздуха из раствора технологически возможна двумя путями:

- 1) при снижении давления над жидкостью, насыщенной воздухом при атмосферном давлении (например, с 100 до 30–40 кПа);
- 2) предварительным насыщением воды воздухом при избыточном давлении с последующим его снижением до атмосферного (например, с 300–600 до 100 кПа).

В первом случае флотация получила название *вакуумной*, а во втором – *напорной* или *компрессионной*.

Вакуумные установки. Преимуществами вакуумной флотации перед другими способами насыщения сточных вод воздухом является то, что образование пузырьков газа, их слипание с частицами загрязнений и всплывание агрегатов пузырьков – частица происходят в спокойной среде, вероятность обратного процесса (разрушения агрегатов) сводится к минимуму, и затраты энергии на насыщение жидкости воздухом, на образование и измельчение пузырьков, то есть на весь процесс флотации, минимальны.

К числу недостатков следует отнести незначительную степень насыщения стоков пузырьками газа, что сужает диапазон применения вакуумной флотации и не позволяет применять ее для жидкостей со сравнительно высокой концентрацией (более 250–300 мг/л) нерастворенных загрязнений, способных флотироваться.

Вторым недостатком является необходимость сооружения герметически закрытых резервуаров, в которых можно осуществлять частичный вакуум, с размещением внутри них скребковых механизмов, что сопряжено с определенными конструктивными и, главное, эксплуатационными трудностями. Любой, даже очень мелкий, ремонт и осмотр механической части невозможны без полного выключения флотационной камеры из работы.

Вакуумная флотационная установка, предназначенная для предварительной очистки бытовых сточных вод, представлена на рис.1.17.

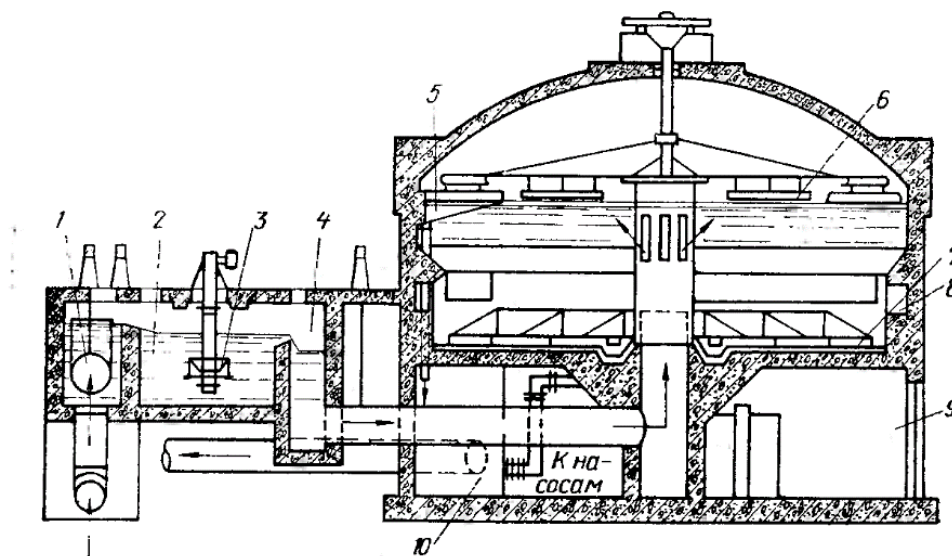


Рис.1.17. Схема вакуумного флотатора:

- 1 – регулятор поступления сточной жидкости; 2 – аэрационная камера;
 3 – аэратор; 4 – деаэратор; 5 – лоток для приема шлама; 6 – поверхностные скребки; 7 – донные скребки; 8 – кольцевой желоб для отвода очищенной воды;
 9 – техническое помещение; 10 – шламоприемник

Она представляет собой герметический резервуар диаметром 10,5 м и высотой 3,6 м (глубина воды 3,1 м) с купольным перекрытием. Под днищем резервуара имеется технологическое помещение, где размещаются подающие и отводящие трубы, шламо- и грязеприемник, насосы для откачки шлама и осадка и пульт управления. Сточная жидкость, поступающая на

флотацию, предварительно насыщается воздухом в течение 1–2 мин в аэрационной камере механическим аэратором. Из камеры аэрации сточные воды переливаются в деаэратор для удаления нерастворившегося воздуха. Затем под действием разрежения сточные воды поднимаются во флотационную камеру, где оказываются под пониженным давлением.

Растворившийся при атмосферном давлении воздух выделяется в виде микропузырьков и выносит часть загрязнений в пенный слой. Скапливающаяся пена вращающимися скребками отводится в пеносборник, а оттуда – в грязеприемник. Кроме поверхностных, флотационная камера оборудована еще донными скребками для удаления осадка, выпавшего на дно. Осветленная вода собирается кольцевым желобом, отделенным от камеры дырчатой перегородкой из листовой стали, и направляется на дальнейшую обработку.

Разрежение во флотационной камере составляет 30–40 КПа и первоначально создается вакуум-насосом, который в дальнейшем может работать непрерывно или периодически, откачивая сравнительно небольшое количество газа, выделяющегося во флотационной камере.

Продолжительность пребывания сточной жидкости в камере флотации около 20 мин. Средняя нагрузка на 1 м² водного зеркала составляет около 9 м³/ч.

Напорные установки. Наибольшее распространение в практике очистки сточных вод получила напорная флотация. Основными элементами напорной флотационной установки являются напорный резервуар для предварительного насыщения воды воздухом (сатуратор) и флотационный резервуар (флотатор) для образования флотоагрегатов и выделения их из воды.

Сатуратор является одним из важных узлов установки напорной флотации, от работы которого зависит эффективность метода.

На рис. 1.18 представлены три характерные конструкции сатураторов.

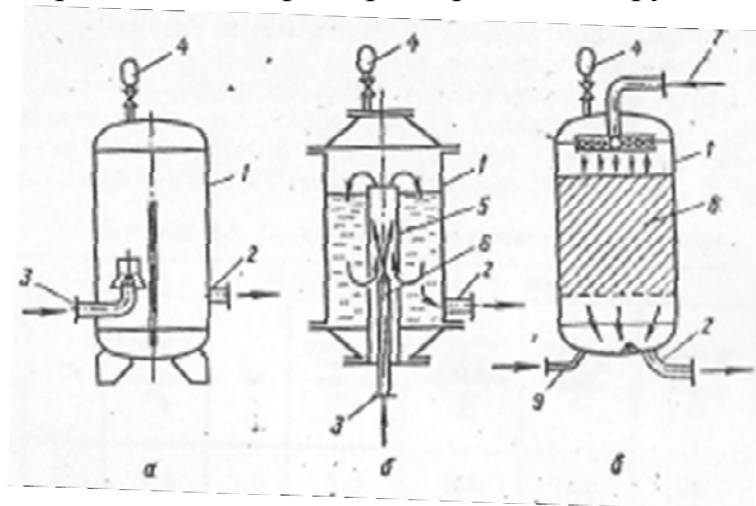


Рис. 1.18. Конструкции сатураторов:

- 1 – корпус; 2 – отвод воды, насыщенной воздухом; 3 – подача водовоздушной смеси; 4 – предохранительный клапан; 5 – струенаправляющий цилиндр;
- 6 – сопло; 7 – подача сточных вод; 8 – загрузка из колец Рашига;
- 9 – подача воздуха

Первая конструкция (рис.1.18, а) включена в типовые проекты флотационных установок, поэтому она наиболее часто встречается в схемах флотационных установок. Однако, как показывают исследования, эта конструкция является малоэффективной. Значительно бóльшая поверхность контакта фаз обеспечивается в конструкции, показанной на рис.1.18,б. В этом случае при той же производительности объем сатуратора можно уменьшить на 25–30%. Наибольшую эффективность растворения воздуха в воде при одновременном уменьшении объема обеспечивает сатуратор с насадкой (рис. 1.18,в). В качестве насадки можно использовать кольца Рашига 50·50·50 или 100·100·100 мм. Насадка имеет высоту 0,5–1 м и расположена на ложном перфорированном днище. Жидкость подается на насадку через дырчатую систему трубопроводов или сопел с отверстиями 5–30 мм. Система подачи сточных вод расположена над слоем насадки на высоте 0,3–0,7 м. Как показывают исследования, продолжительность насыщения воды воздухом в насадочном сатураторе можно сократить до 1–0,5 мин.

Так, на флотационной установке очистных сооружений завода фирмы Шелл (г. Сарния в Канаде) применен сатуратор с насадкой в виде седла, при этом продолжительность насыщения воды воздухом составляет всего 30 с [135].

Высокой эффективностью отличается и сатуратор со струйной аэрацией, представляющий собой горизонтальный цилиндрический резервуар, в котором поверхность взаимодействия газовой и жидкой фаз образуется за счет вовлечения и дробления воздуха на пузырьки струями, изливающимися под напором на открытую поверхность жидкости. Ее уровень в напорном резервуаре поддерживается с помощью нижней перегородки и регулированием подачи воздуха. Для предотвращения поступления во флотатор пузырьков нерастворившегося воздуха в напорном резервуаре устраивается шлюзовая камера путем установки верхней перегородки.

Напорная подающая труба с соплами при производительности аппарата до 10 м³/ч располагается внутри корпуса (рис.1.19), при большей производительности – снаружи.

Для контроля уровня жидкости в напорном резервуаре и шлюзовой камере устраиваются водомерные стекла или колонки с поплавковыми датчиками для автоматического контроля (на напорных резервуарах диаметром более 0,5 м).

В сатураторе со струйной аэрацией при вышеуказанных условиях за 20–30 секунд пребывания в воде растворяется 70–80 % воздуха от теоретически возможного.

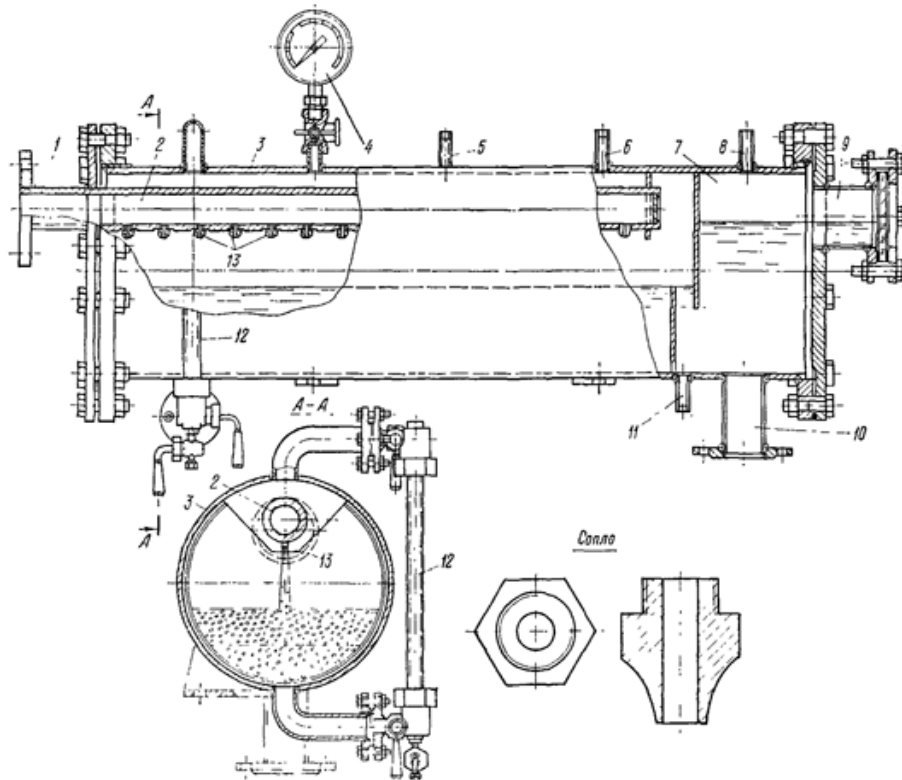


Рис.1.19. Напорный резервуар со струйной аэрацией

с внутренним расположением напорной трубы с соплами:

- 1 – входной патрубок; 2 – напорная труба с соплами; 3 – корпус резервуара;
 4 – манометр; 5 – патрубок для ввода коагулянта; 6 – патрубок для ввода сжатого воздуха;
 7 – шлюзовая камера; 8 – патрубок для продувки шлюзовой камеры;
 9 – смотровое окно; 10 – выпускной патрубок; 11 – патрубок для отбора проб или ввода датчика растворенного кислорода; 12 – водомерное стекло; 13 – сопла

Подача воздуха в воду на отечественных установках, как правило, осуществляется эжектором, включенным в систему насоса, направляющего воду в сатуратор. Такая подача воздуха отрицательно сказывается на работе насосов, так как вызывает кавитацию и их интенсивный износ, что требует периодического ремонта. В зарубежной практике более часто встречается подача воздуха непосредственно в сатуратор от компрессора. В этом случае воздух вводится в нижнюю часть сатуратора. Зарубежные специалисты отмечают большую эффективность и экономичность такой схемы. Следует отметить, что при подаче воздуха компрессором давления, обеспечиваемые рабочим насосом и компрессором, должны быть равны. Чтобы избежать попадания воды в воздушную систему и воздуха в водную при неравенстве давлений, на трубопроводах подачи воды и воздуха должны быть установлены обратные клапаны.

Снижение давления от избыточного до атмосферного при напорной флотации может осуществляться по двум вариантам: резко – с помощью дросселирования и постепенно (плавно) – без дросселирования.

Напорная флотация без дросселирования реализуется в эрлифтных флотационных установках и установках глубинно-адгезиционной сепарации.

В эрлифтной установке (рис.1.20) из питательного бака (расположенного на высоте 20–30 м) сточная жидкость поступает в аэратор. Туда же через перфорированную трубу подается сжатый воздух. Поднимаясь по подъемному трубопроводу вверх в результате снижения давления, жидкость обогащается микропузырьками воздуха, выделяющимися из раствора. Воздушно-водяная эмульсия поступает в отстойник, где происходит осветление жидкости. Пена и сфлотировавшиеся загрязнения всплывают и удаляются самотеком или скребками, а осветленная вода снизу направляется на дальнейшую обработку.

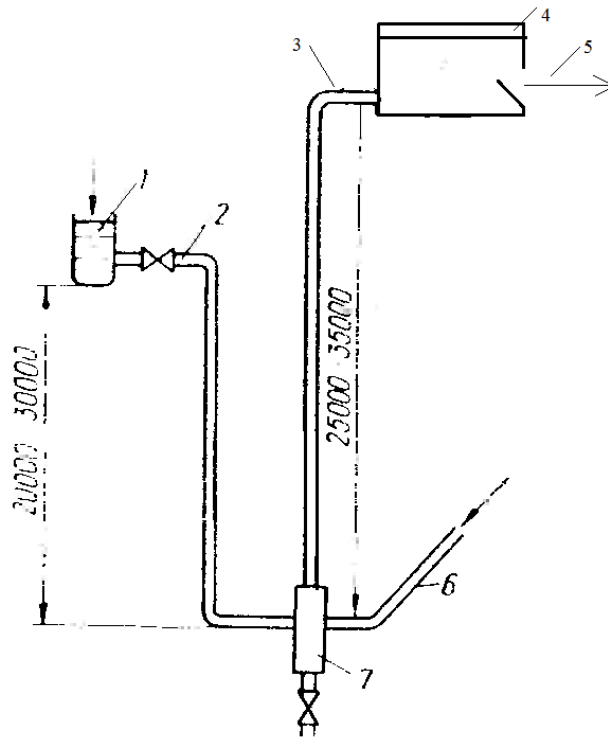


Рис. 1.20. Схема эрлифтной флотационной установки:
 1 – питательный бак; 2 – подающий трубопровод; 3 – труба эрлифта;
 4 – флотационная камера; 5 – выпуск очищенных вод;
 6 – трубопровод подачи воздуха; 7 – аэратор

Эрлифтные флотационные установки применяются для очистки некоторых загрязненных технологических растворов в химической промышленности [84].

В установках глубинно-адгезионной сепарации очищаемая вода подается в зону компрессии – специально пробуренную скважину глубиной до 50–100 м. Туда же подается воздух, растворяющийся в воде под действием статического давления. При обратном движении по мере падения давления воздух выделяется из раствора, и постепенно расширяющиеся пузырьки (вследствие продолжающегося падения давления) все быстрее двигаются вверх, выходя из объема воды, в котором они образовались. В этом объеме по мере возникновения пересыщения образуются новые пузырьки. Таким образом, при движении воды из зоны компрессии к отстойнику у верхнего

конца скважины в ней постоянно поддерживается большая удельная поверхность раздела газ – жидкость, адвигающиеся в воде пузырьки проходят относительно воды большой путь. Все это способствует повышению эффективности захвата частиц пузырьками. Для улучшения отделения пузырьков организована подача воды замедляющимся потоком непосредственно под ее поверхность в отстойнике. При глубине скважины 80–90 м эффективность очистки достигает 90–95%.

К напорным флотационным установкам с дросселированием насыщенной воздухом жидкости относятся многочисленные типы весьма распространенных флотационных установок с горизонтальными, вертикальными и радиальными флотаторами, глубина слоя жидкости в которых составляет 2–5 м, а давление насыщения в напорном резервуаре находится в пределах 200–600 кПа. В связи с тем, что выделение из воды тонкодиспергированных примесей безреагентной напорной флотацией осуществляется недостаточно полно, для повышения эффекта очистки может быть применена химическая коагуляция.

Флотационные резервуары (флотаторы) предназначены для образования флотоагрегатов и выделения их из потока очищаемой жидкости. В связи с этим они состоят из двух основных частей: 1) флотационной камеры, в которой в основном осуществляется взаимодействие пузырьков и частиц, то есть собственно флотация примесей из воды; 2) выделительной камеры, в которой образовавшиеся флотоагрегаты в основном выделяются из потока воды. Образование флотоагрегатов во флотационной камере обычно сопровождается выделением в пенный слой фракций с большой гидравлической крупностью, а выделению флотоагрегатов в выделительной камере может сопутствовать процесс дополнительного их образования в зоне восходящего движения пузырьков воздуха.

В многочисленной отечественной и зарубежной литературе описываются разнообразные типы флотационных резервуаров. Однако по конструктивному исполнению основными являются горизонтальные, вертикальные и радиальные флотаторы рис.1.21-1.24.

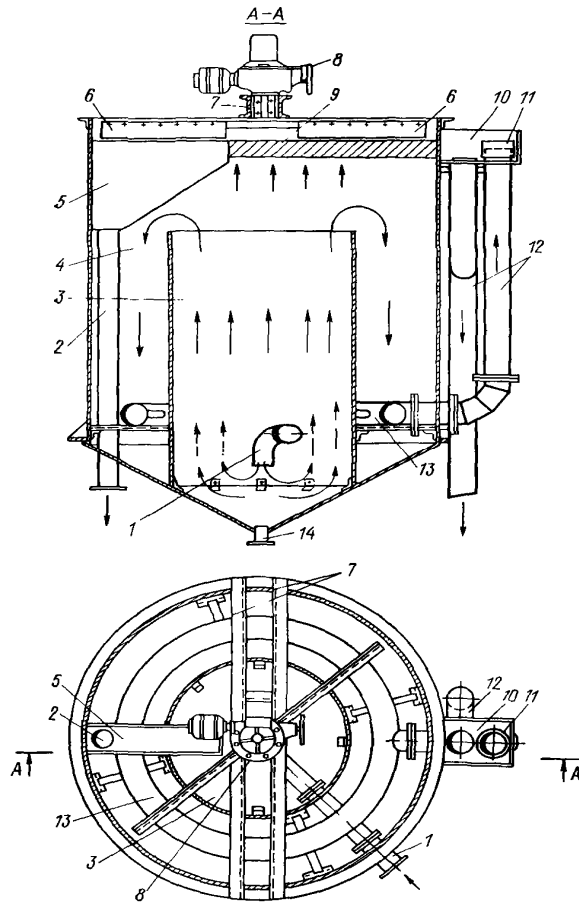


Рис. 1.21. Устройство вертикального флотатора:
 1 – впускная труба; 2 – выпуск пенной массы; 3 – флотационная камера;
 4 – выделительная камера; 5 – приемный карман пенной массы; 6 – скребок;
 7 – опорная балка скребкового механизма; 8 – электропривод; 9 – слой всплыв-
 шей массы; 10 – сливная камера очищенной воды; 11 – муфта для регулирования
 уровня воды; 12 – сливная труба; 13 – сборная щелевая труба;
 14 – патрубок опорожнения флотатора

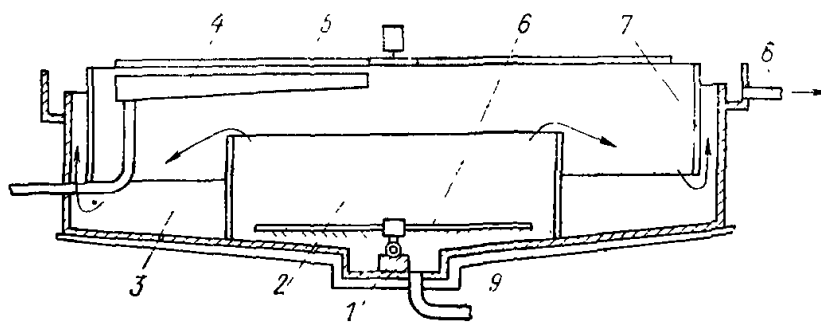


Рис. 1.22. Устройство радиального флотатора:
 1 – основание; 2 – зона флотации; 3 – зона разделения; 4 – желоб для сбора пены;
 5 – скребки; 6 – вращающийся водораспределитель; 7 – кольцевая перегородка;
 8 – трубопровод отвода очищенной воды; 9 – трубопровод отвода осадка

Горизонтальные и вертикальные флотаторы целесообразно применять на очистных станциях производительностью до 100 м³/ч, радиальные – на станциях большей производительности. Для повышения эффективности и надежности горизонтальных и вертикальных флотаторов иногда по предложению ЦНИИ МПС их делают многокамерными (см. рис. 1.23) [52].

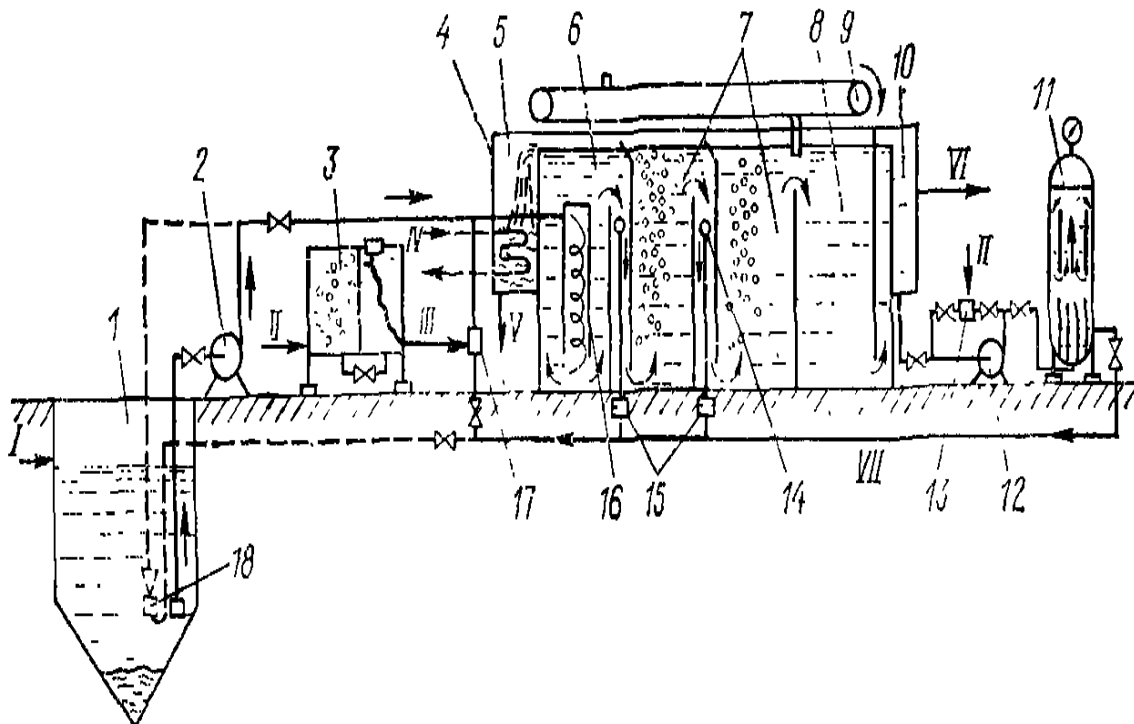


Рис. 1.23. Устройство многокамерного флотатора:

- 1 – усреднитель-отстойник; 2 – низконапорный насос; 3 – затворно-дозировующий бак; 4 – флотатор; 5 – сборный карман для нефтепродуктов; 6–8 – смешительная, флотационные и выделительная камеры; 9 – скребковый механизм; 10 – карман для очищенной воды; 11 – напорный резервуар; 12 – рециркуляционный насос; 13 – эжектор водовоздушный; 14 – распределительные трубы; 15 – диафрагмы; 16 – вихревой смеситель; 17 – эжектор для подачи раствора коагулянта; 18 – гидроэлеватор; I, VI и VII – очищаемая, очищенная и рециркулируемая вода; II – воздух; III – коагулянт; IV – пар; V – нефтепродукты

Для очистки сточных вод нефтебаз с расходами от 5 до 100 м³/ч представляются перспективными колонные флотаторы (см. рис.1.24) [115]. Они имеют высоту не менее 8–10 м и состоят из двух частей: нижней – флотационной колонны, выполняющей роль флотационной камеры, и верхней – выделительной камеры. Колонный флотатор по сравнению с горизонтальными, вертикальными и радиальными флотаторами имеет следующие преимущества:

1) создает дополнительные возможности для повышения эффекта очистки и производительности установки, так как в нем удлиняется путь совместного движения потока жидкости и всплывающих пузырьков воздуха и увеличивается вероятность взаимного закрепления пузырьков и частиц;

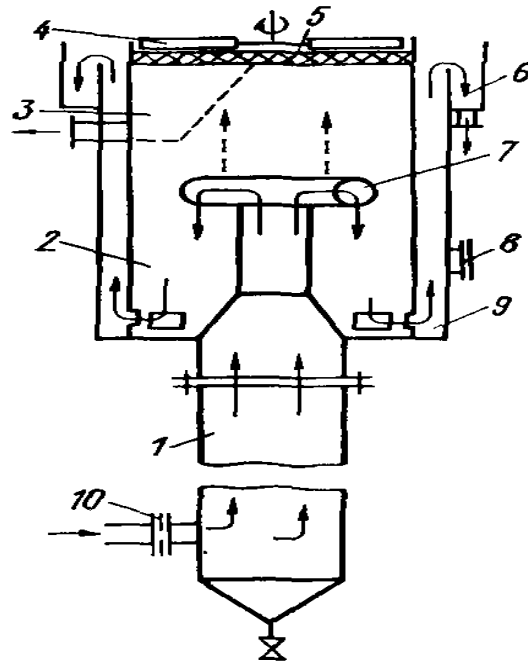


Рис. 1.24. Устройство колонного флотатора:

1 – флотационная колонна; 2 – выделительная камера; 3 – сборный карман пенной массы; 4 – скребковое устройство; 5 – пенный слой; 6 – отводящий лоток; 7 – радиальный водораспределитель; 8 – смотровое окно; 9 – кольцевое пространство; 10 – дросселирующая диафрагма на впускном патрубке

2) после дросселирования пересыщенной воздухом жидкости в колонном флотаторе остается некоторое пересыщение воды воздухом, что наряду с уменьшением гидростатического давления способствует увеличению размеров пузырьков за счет диффузии воздуха в процессе всплывания и позволяет уменьшить размеры выделительной камеры;

3) при применении коагуляции в колонном флотаторе создаются наиболее благоприятные условия для совместного протекания процессов хлопьеобразования и флотации.

Повысить эффективность флотаторов можно за счет использования тонкослойных элементов (ламелей) в выделительной камере флотаторов, по аналогии с тонкослойными отстойниками, так называемыми полочными (ламельными) флотаторами [123].

Если разделяемая суспензия пропускается между наклонными пластинами, частица поднимается вертикально до тех пор, пока она не коснется верхней пластины. После этого частица поднимается вверх, скользя вдоль пластины. В то же время жидкость движется вертикально вниз до тех пор, пока она не коснется нижней пластины. После этого жидкость движется вдоль пластины вниз. Поток частиц, поднимающихся к поверхности, не встречает сопротивления потока воды, движущейся вниз. В результате процесс разделения двух потоков проходит гораздо быстрее.

На рис. 1.25 изображена схема противоточного движения потоков воздуха и жидкости в процессе традиционной (а) и ламельной (б) флотации.

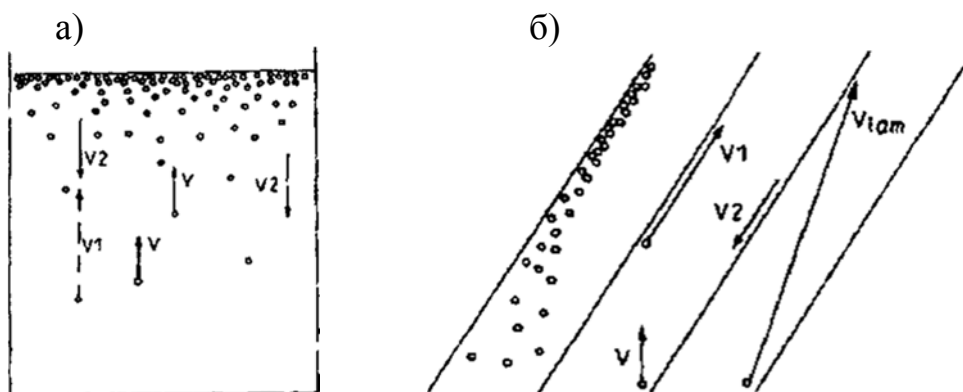


Рис.1.25. Направление движения потоков хлопьев и воды при традиционной флотации (а) и ламельной (б) флотации

Ламельная технология Megacell использует как прямоточное, так и противоточное движение потоков в одном пакете ламелей. Это достигается за счет вывода осветленной воды в нижней точке между двумя ветвями U-образной ламели [123].

В первой стадии поток частиц и поток жидкости движутся сонаправленно между U-образными ламелями. Таким образом, скорость потока всплывающих частиц не тормозится идущей вниз водой, как происходит в традиционных ламельных флотаторах. Над пакетом ламелей частицы продолжают движение вверх к поверхности воды, а осветляемая вода движется вниз в пространство между U-образными ламелями. В этой второй стадии разделение происходит по противоточной модели. В отличие от традиционных ламельных флотаторов, использующих противоточную модель, в Megacell пространство над пакетом ламелей занято только поднимающимся потоком частиц и флотошлом, который не испытывает сильных напряжений от распределения сточной воды.

Сточная вода распределяется через специальные распределительные трубы под пакетом ламелей по всей длине флотатора. В зависимости от ширины флотатора могут быть установлены одна или две распределительные трубы. Трубы имеют переменную площадь сечения для поддержания одинаковой скорости воды по всей длине флотатора (рис.1.26).

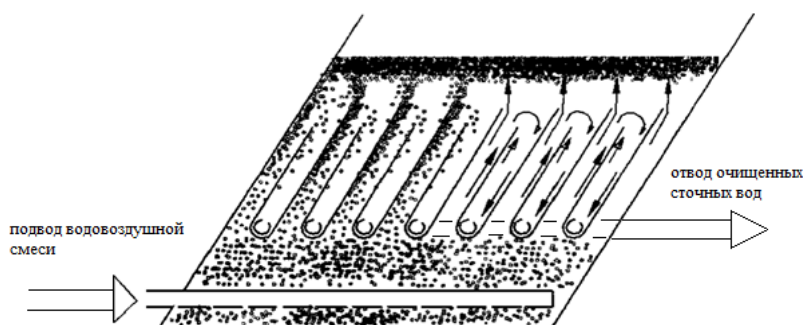


Рис. 1.26. Принципиальная схема флотатора марки Megacell компании «KWI. inc»

Осветленная вода выводится через дно каждой U-образной ламели в общий коллектор, расположенный сбоку флотационной ванны. На больших установках на выходе из коллектора установлен автоматический регулирующий клапан, поддерживающий постоянный уровень воды во флотаторе.

Флотошлам либо удаляется спиральным сборником, либо подводится скребковым механизмом к лопастному механизму, выводящему флотошлам. Шлам переливается в шламовую камеру.

Производительность флотатора Megasell зависит от числа установленных U-образных ламелей. Максимальная пропускная способность одной U-образной ламели составляет 12,5 м³/ч. Это эквивалентно гидравлической нагрузке 30 м³/(м²·ч). Благодаря запатентованной конфигурации U-образных ламелей во флотаторе Megasell по сравнению с традиционными флотаторами можно проводить процесс разделения при меньшем проценте рецикла. Так как больше всего энергию потребляет именно рециркуляционный насос, это дает дополнительную экономию текущих затрат.

Производительность флотационной установки может быть повышена за счет использования эффекта действия центробежной силы. Этот принцип

реализуется в процессе работы вихревого флотатора (рис.1.27) [103].

В вихревом флотаторе водовоздушная смесь образуется в эжекторе, а процесс флотации и отделения пузырьков от воды производится в напорном гидроциклоне, расположенном соосно с эжектором. Вода под давлением подается в приемную камеру эжектора и через его сопло поступает в смеситель, куда подсасывается атмосферный воздух. Водовоздушная смесь через тангенциальный аппарат подается в гидроциклон, в котором пузырьки отделяются к оси вихря и отводятся с пеной через верхний патрубок, а очищенная вода – через дроссель в отводной патрубок.

Испытания полупромышленного вихревого флотатора показали возможность очистки в нем сточных вод с эффективностью до 68%, причем с увеличением производительности в 1,5 раза (при увеличении давления воды перед аппаратом) эффективность очистки воды не снижалась. Влажность пены, отводимой из верхнего патрубка аппарата, в зависимости от вида и

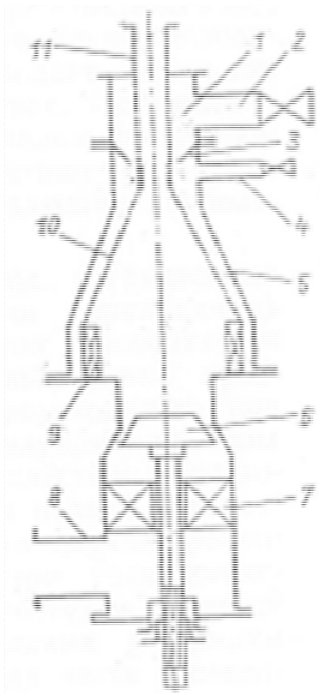


Рис. 1.27. Вихревой флотатор:
 1 – приемная камера; 2, 4, 8 и 11 – соответственно водоподводящий, воздухоподводящий, водоотводящий и пеноотводящий патрубки; 3, 5 – сопло и корпус эжектора; 6 – дроссель;
 7 – спрямляющий аппарат;
 9 – тангенциальный лопаточный аппарат; 10 – корпус гидроциклона

концентрации флотируемой примеси может регулироваться перемещением дросселя в нижней части гидроциклона.

Принцип предварительного разделения водовоздушной смеси в поле действия центробежных сил также был реализован в конструкции флотофильтра «Klaricell» компании «K.W.I.n.i.» (рис.1.28) [123].

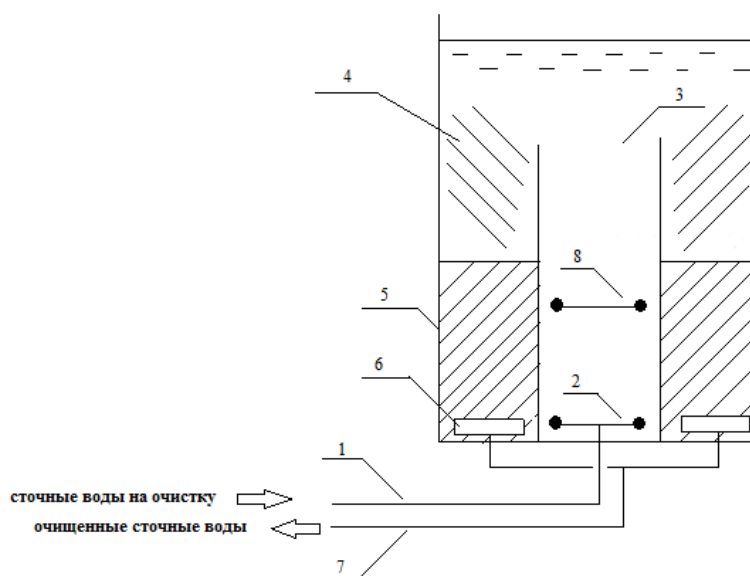


Рис.1.28. Схема флотофильтра «Klaricell» компании «K.W.I.n.i.»:
1 – подача сточных вод; 2 – распределительная система сточных вод;
3 – входная камера; 4 – наклонные ламели; 5 – песчаная фильтрующая загрузка; 6 – дренажная система; 7 – отвод очищенных сточных вод;
8 – распределительная система водовоздушной смеси

За счет тангенциальной подачи сточных вод во входную камеру флотофильтра через сопло распределительной системы, в ней создается вращательно-поступательное движение жидкости. Водовоздушная смесь, подаваемая во входную камеру через распределительную систему 8, подхватывается движущимся вверх вращающимся потоком сточных вод. Под действием центробежных сил во входной камере, пузырьки воздуха движутся к оси потока. Поскольку сопротивление фильтрующей песчаной загрузки достаточно велико, нисходящий поток, движущийся через наклонные ламели (4), равномерно распределяется по всей площади флотофильтра (5). Во флотофильтре реализуется принцип одинаковой гидравлической нагрузки как для зоны флотации, так и для зоны фильтрации. Флотофильтры используются в процессах глубокой доочистки сточных вод.

Технологические показатели водовоздушной смеси для основных способов ее получения представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Показатели водовоздушной смеси при разных способах ее получения

Показатели	Способы получения водовоздушной смеси				
	Подача воздуха через пористые материалы	Импеллерная флотация	Гидродинамическое диспергирование	Компрессионный и вакуумный	Электрохимический
Диаметр газовых пузырьков в чистой воде (средний), мкм	2000-6000	300-500	500-1500	20-100	100-200
Удельная поверхность газовой дисперсии (средняя), м ² /м ³	1000-3000	12000-60000	4000-12000	15000-30000	30000-60000
Скорость потока газа через поперечное сечение камеры флотации, м ³ /(м ² ·ч)	10-50	40-50	15-25	0,1-0,3	0,1-0,25
Газонаполнение φ	0,06-0,2	0,025-0,3	0,02-0,3	0,001-0,003	0,002-0,005
Затраты электроэнергии, кВт·ч на 1 м ³ газа	0,015-0,03	0,2-0,3	0,01-0,02	2-5	10-15

Как следует из данных, представленных в табл. 1.1, наиболее мелкодисперсную водовоздушную смесь ($d_{п} = 20-100$ мкм) позволяет получить метод выделения воздуха из пересыщенного раствора, однако величина коэффициента газонаполнения при этом не превышает $\phi = 0,001-0,003$.

Метод гидродинамического диспергирования воздуха позволяет достичь максимального значения величины коэффициента газонаполнения водовоздушной смеси $\phi=0,3$, но он не обеспечивает получение пузырьков воздуха размером менее $d_{п} = 100$ мкм.

Выводы

1. Наибольшее распространение в технологиях очистки производственных сточных вод, содержащих нефтепродукты, получили флотационные методы.

2. Широко применяемые в настоящее время технологии напорной (компрессионной) флотации позволяют получить мелкодисперсную водовоздушную смесь ($d_{п}=20-100$ мкм), при этом величина ее газонаполнения не превышает $\phi=0,001-0,003$.

3. Методы флотации с подачей воздуха через пористые материалы, механического и гидродинамического диспергирования водовоздушной смеси позволяют достичь максимального газонаполнения $\varphi=0,1-0,3$, но не обеспечивают требуемую при очистке нефтесодержащих сточных вод степень дисперсности водовоздушной смеси.

4. Повысить эффективность флотационной очистки нефтесодержащих сточных вод можно за счет увеличения газонаполнения водовоздушной смеси до $\varphi=0,1-0,3$ при среднем диаметре содержащихся в ней воздушных пузырьков $d_{п}=20-100$ мкм.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФЛОТАЦИОННОГО МЕТОДА ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД, СОДЕРЖАЩИХ НЕФТЕПРОДУКТЫ

2.1. Теоретические основы элементарного акта взаимодействия единичной флотируемой частицы с единичным пузырьком воздуха

В соответствии с представлениями, выдвинутыми академиком А.Н. Фрумкиным [136], под кинетикой флотационного удаления дисперсных частиц следует понимать рассмотрение во времени всех элементарных актов этого процесса.

В качестве элементарного акта флотации, проходящего по механизму столкновения, было предложено рассматривать взаимодействие единичной

дисперсной частицы загрязнения с единичным пузырьком воздуха, при этом выделяются две основные стадии процесса: сближение поверхности дисперсной частицы с пузырьком воздуха и закрепление пузырька воздуха на поверхности частицы.

Теоретические основы кинетики элементарного акта процесса флотации были разработаны Б.В. Дерягиным и представителями его научной школы [115].

Схематично процесс сближения дисперсной частицы загрязнения с пузырьком воздуха представлен на рис.2.1.

При описании процесса сближения дисперсной частицы с пузырьком воздуха были сделаны следующие допущения:

1. Начало координат размещается в центре пузырька воздуха.
2. Пузырек воздуха неподвижен.
3. Дисперсная частица вместе с окружающим ее потоком жидкости набегает на пузырек воздуха по соответствующей траектории.
4. Пузырек воздуха и дисперсная частица имеют строго сферическую форму.
5. Возмущение, которое вносит дисперсная частица в гидродинамическое поле пузырька, локализовано лишь в малой области

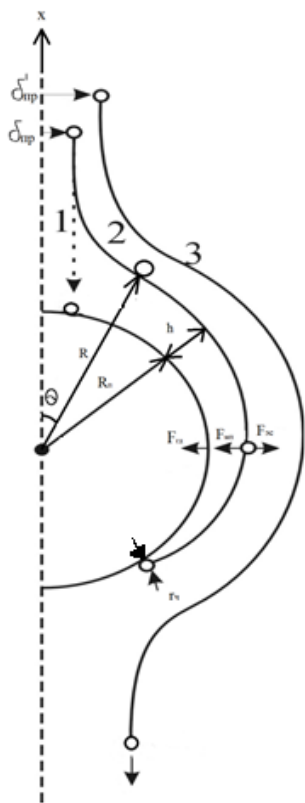


Рис.2.1. Траектория сближения флотируемой частицы с пузырьком газа:

- 1 – траектория инерционной частицы;
- 2 – траектория безынерционной частицы;
- 3 – траектория безынерционной частицы, находящейся за пределами трубки тока

вблизи частицы и не влияет на полное распределение скоростей жидкости вокруг пузырька воздуха.

6. Дисперсная частица имеет достаточный размер, позволяющий пренебречь действием броуновских сил.

7. Разница плотностей дисперсной частицы и воды не очень велика, вследствие чего эффект седиментации несущественен.

В соответствии с рассматриваемой схемой на дисперсную частицу, имеющую радиус r_r и набегающую на неподвижный пузырек воздуха радиусом R_n , действуют следующие силы: $F_{дгд}$ – сила дальнего гидродинамического взаимодействия частицы и пузырька воздуха; $F_{ин}$ – сила инерции; $F_{пс}$ – прижимная сила ближнего гидродинамического взаимодействия; $F_{эс}$ – сила электростатического взаимодействия частицы и пузырька воздуха; $F_{мп}$ – сила молекулярного притяжения (сила Ван-дер-Ваальса) между частицей и пузырьком воздуха.

Возникновение силы дальнего гидродинамического взаимодействия $F_{дгд}$ обусловлено искривлением траектории потока воды, движущейся вместе с частицей при ее набегании на поверхность пузырька воздуха. При обтекании поверхности пузырька жидкостью линии тока искривляются, увлекая за собой движущуюся вместе с жидкостью дисперсную частицу.

Сила инерции $F_{ин}$ стремится скомпенсировать действие силы дальнего гидродинамического взаимодействия $F_{дгд}$. Если величина силы инерции $F_{ин}$ намного превышает величину силы дальнего гидродинамического взаимодействия $F_{дгд}$, то дисперсная частица считается инерционной. Если величина силы инерции $F_{ин}$ будет существенно меньше величины силы дальнего гидродинамического взаимодействия $F_{дгд}$, то дисперсная частица считается безынерционной.

В процессе приближения к поверхности пузырька воздуха траектория инерционной дисперсной частицы изменяется незначительно, так как действие сил инерции полностью компенсирует действие силы дальнего гидродинамического взаимодействия (траектория 1, рис.2.1). Траектория движения такой дисперсной частицы будет прямолинейной. Столкновение дисперсной частицы с пузырьком воздуха произойдет в случае, если прицельное расстояние δ_{np} (расстояние между проекциями центра пузырька и центра частицы), меньше суммы радиуса пузырька и радиуса частицы (см. рис.2.1):

$$\delta_{np} < R_n + r_r, \text{ м.}$$

В соответствии с рекомендациями [127] возможность инерционного осаждения флотируемой частицы на пузырьке воздуха определяется безразмерным параметром

$$\lambda = \frac{\ell}{R_n}, \quad (2.1)$$

где ℓ – инерционный пробег флотируемой частицы, м; R_n – радиус пузырька воздуха.

Инерционное осаждение дисперсной частицы на поверхность пузырька воздуха возможно, если $\lambda \leq \lambda_{кр}$.

Условие равенства величины кинетической энергии E_k , которой обладает движущаяся частица, и величины работы силы трения A_T между поверхностью частицы и водой на расстоянии инерционного пробега позволяет определить значение l .

$$E_k = A_T, \text{ Дж.} \quad (2.2)$$

Для дисперсной частицы массой m_c , движущейся навстречу пузырьку воздуха со скоростью v_n , будут справедливы выражения:

$$E_k = m_c \frac{v_n^2}{2} = (\rho_c - \rho_w) W_c \frac{v_n^2}{2} = \frac{4}{3} \pi r_c^3 v_n^2 (\rho_c - \rho), \text{ Дж,} \quad (2.3)$$

$$A_T = F_T l = 6\pi \mu v_n r_c l, \text{ Дж,} \quad (2.4)$$

где m_c – масса дисперсной частицы, кг; v_n – скорость движения дисперсной частицы относительно пузырька воздуха (скорость всплывания пузырька), м/с; ρ_c – плотность вещества дисперсной частицы, кг/м³; ρ – плотность воды, кг/м³; μ – динамический коэффициент вязкости воды, Па·с; F_T – сила трения, действующая на частицу, Н.

Подставляя (2.3) и (2.4) в (2.2), имеем:

$$\frac{4}{3} \pi r_c^3 \frac{v_n^2}{2} (\rho_c - \rho) = 6\pi \mu v_n r_c l, \quad (2.5)$$

откуда

$$l = \frac{v_n r_c^2}{9\mu} (\rho_c - \rho). \quad (2.6)$$

В работе [127] приводится критическое значение параметра $\lambda_{кр} = \frac{1}{24}$.

Подставляя критическое значение параметра $\lambda_{кр}$ в формулы (2.1) и (2.6), можно определить величину критического радиуса дисперсной частицы $r_{ч.кр}$, являющуюся максимальным значением, при котором возможно сближение частицы с пузырьком воздуха по инерционному механизму.

$$\lambda_{кр} = \frac{v_n r_{ч.кр}^2}{9\mu R_n} (\rho_c - \rho) = \frac{1}{24},$$

откуда

$$r_{ч.кр} = \sqrt{\frac{9}{24} \frac{R_n \mu}{v_n (\rho_c - \rho)}} = \sqrt{\frac{9}{24} \frac{R_n v}{v_n} \cdot \frac{\rho}{\rho_c - \rho}}, \text{ м,} \quad (2.7)$$

где $v = \frac{\mu}{\rho}$ – кинематический коэффициент вязкости воды, м²/с.

Поскольку скорость набегания дисперсной частицы на поверхность пузырька воздуха равна скорости всплывания пузырька относительно воды, в соответствии с законом Стокса имеем:

$$v_n = \frac{2gR_n^2}{9\nu} \cdot \frac{\rho - \rho_g}{\rho} \quad (\text{м/с}), \quad (2.8)$$

где ρ_g – плотность воздуха, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Подставляя (2.8) в (2.7), имеем:

$$r_{ч.кр} = \sqrt{\frac{9}{24} R_n \nu \frac{\rho}{\rho_ч - \rho} \cdot \frac{9\nu}{2gR_n^2} \cdot \frac{\rho}{\rho - \rho_g}} = \frac{9}{4\sqrt{3}} \sqrt{\frac{\nu^2}{gR_n} \frac{\rho^2}{(\rho_ч - \rho)(\rho - \rho_g)}}, \text{ м.} \quad (2.9)$$

В случае, когда радиус флотируемой частицы $r_ч$ превышает величину критического радиуса $r_{ч.кр}$, вычисленную по формуле (2.9), возможно ее инерционное осаждение на поверхности пузырька воздуха.

Вероятность инерционного осаждения флотируемой частицы пузырьком воздуха по мере уменьшения $r_ч$ снижается.

Интенсивность процесса флотационной очистки сточных вод принято оценивать по скорости изменения величины счетной концентрации дисперсных частиц N , шт./м³. При описании кинетических закономерностей процесса флотации К.Ф. Белоглазовым было предложено не учитывать величину счетной концентрации воздушных пузырьков во флотируемом объеме, так как она остается неизменной [96]. Им было получено уравнение для определения скорости процесса флотации, имеющее вид:

$$\frac{dN}{dt} = -KN^a \quad (\text{шт./м}^3\text{с}), \quad (2.10)$$

где N – счетная концентрация флотируемых частиц, шт/м³; K – константа скорости флотации, с⁻¹; a – показатель степени.

Приняв значение $a = 1$ и проинтегрировав выражение, можно получить формулу, описывающую кинетику процесса флотации монодисперсных частиц коллективом газовых пузырьков:

$$N_T = N_O \ell^{-kT}, \text{ шт./м}^3, \quad (2.11)$$

где N_O и N_T – соответственно счетные концентрации флотируемых частиц в начальный момент времени и через T секунд.

Переходя к безразмерной форме, путем введения понятия коэффициента извлечения флотируемых частиц $\alpha = 1 - \frac{N_T}{N_O}$ формулу (2.11) можно записать

в виде

$$\alpha = 1 - \ell^{kT}. \quad (2.12)$$

Коэффициент скорости процесса флотации в формуле (2.12) имеет размерность величины, обратной времени:

$$k = \frac{1}{\tau} (c^{-1}), \quad (2.13)$$

где τ – характерное время очистки сточных вод, в течение которого концентрация флотируемых частиц убывает в ℓ раз.

Величину коэффициента скорости процесса флотации при известных значениях счетных концентраций флотируемых частиц N_0 и N_T , зная продолжительность процесса флотации T , можно определить по формуле

$$k = \frac{\ell n \frac{N_0}{N_T}}{T} (c^{-1}). \quad (2.14)$$

Дерягиным Б.В. было предложено для определения величины константы скорости извлечения флотируемых частиц использовать следующую формулу [51]:

$$k = \frac{3q_0 E}{4Rn} (c^{-1}), \quad (2.15)$$

где q_0 – объем газа пропускаемого через единицу площади поперечного сечения флотационного объема, $m^3/(m^2 \cdot c)$; R_n – радиус пузырька воздуха, м; E – коэффициент захвата флотируемой частицы пузырьком воздуха.

Поскольку в реальных полидисперсных водовоздушных смесях наблюдается распределение пузырьков воздуха по размерам, близкое к нормальному, в качестве радиуса пузырька воздуха принимают его среднестатистические значения \bar{R}_n .

Коэффициент эффективности захвата флотируемой частицы пузырьком воздуха E , используемый в формуле (2.15), является безразмерной величиной определяемой как квадрат отношения максимального радиуса трубки тока r_T , набегающего на пузырек потока жидкости, все частицы из которого задерживаются на поверхности пузырька, к радиусу пузырька воздуха R_n .

$$E = \left(\frac{r_T}{R_n} \right)^2 \quad (2.16)$$

Для элементарного акта столкновения флотируемой частицы с пузырьком воздуха, в соответствии с рекомендациями [152], величину коэффициента эффективности захвата дисперсной частицы пузырьком воздуха при инерционном механизме флотации рекомендуется определять по формуле

$$E = \frac{\lambda^2}{(\lambda + 0,2)^2} \quad (2.17)$$

Характерной особенностью процесса инерционной флотации, получившей широкое распространение при обогащении руд, является извлечение тяжелых и крупных дисперсных частиц. Так, в соответствии с формулой (2.9), инерционный механизм флотационной очистки с использованием водовоздушной смеси со средним радиусом пузырьков воздуха $R_p = 0,1$ мм при плотности флотируемых частиц $\rho_c = 998,5$ кг/м³ возможен лишь в случае, когда радиус этих частиц превышает $r_c > 1,9$ мм, а при плотности частиц $\rho_c = 2400$ кг/м³ их радиус должен превышать $r_c > 0,035$ мм.

В процессе инерционной флотации, как правило, наблюдается удар дисперсной частицы о поверхность пузырька воздуха, при этом в процессе соударения происходит истечение жидкости из межфазной пленки, и если период соударения достаточно велик, а поверхность частицы достаточно гидрофобна, то соударение может завершиться прорывом пленки, в результате которого на границе раздела фаз «воздух – вода» возникнет трехфазный периметр смачивания, который может выдерживать большие отрывные усилия. Образование трехфазного периметра смачивания обеспечит надежное закрепление дисперсной частицы на поверхности пузырька воздуха и повысит вероятность сохранения ее при воздействии на образовавшийся флотокомплекс силы тяжести либо сил инерции.

Кратковременное воздействие на флотационный объем поля действия центробежных сил может существенно расширить границы действия инерционного механизма захвата дисперсной частицы пузырьком воздуха и интенсифицировать процесс флотации. В этом случае в формулу (2.9) вместо величины ускорения свободного падения g необходимо подставить значение ускорения центробежной силы a_c .

$$a_c = \frac{v_T^2}{R_K}, \text{ м/с}^2, \quad (2.18)$$

где v_T – тангенциальная скорость движения пузырька воздуха, м/с; R_K – радиус кривизны траектории движения пузырька воздуха, м.

В качестве критерия, характеризующего степень уменьшения величины критического радиуса дисперсной частицы, флотируемой по инерционному механизму в поле действия центробежной силы, будет выступать

$$\bar{r}_{чкр} = \frac{r_{чкр}}{r_{ч.кр.ц}} = \sqrt{\frac{v_T^2}{R_{kg}}} = \sqrt{F_r}, \quad (2.19)$$

где $r_{чкр}$ и $r_{ч.кр.ц}$ – соответственно величины критического радиуса дисперсной частицы, флотируемой по инерционному механизму при обычных условиях и в поле действия центробежной силы; F_r – критерий Фруди.

В отличие от инерционных дисперсных частиц, безынерционные дисперсные частицы вблизи поверхности пузырьков воздуха не движутся по

прямой траектории (траектории 2 и 3 на рис.2.1). При обтекании поверхности пузырька воздуха набегающим потоком жидкости линии тока искривляются, увлекая за собой движущуюся в потоке жидкости дисперсную частицу. Чем меньше радиус дисперсной частицы, а также разница плотности ее материала и плотности воды, тем меньше действующие силы инерции и больше приближение ее траектории к траектории линии тока жидкости. Безынерционный механизм будет обеспечивать флотацию дисперсных частиц вплоть до их размера $r_c = 1$ мкм. Для дисперсных частиц размером $r_c < 1$ мкм будет играть существенную роль механизм броуновской флотации, при которой наблюдается диффузионное осаждение частиц на поверхность пузырька воздуха, обусловленное действием броуновских сил.

В процессе движения дисперсной частицы по криволинейной траектории вдоль линии тока жидкости, огибающей поверхность пузырька воздуха, ее положение определяется воздействием на частицу трех сил: силы электростатического взаимодействия $F_{эс}$, прижимной силы ближнего гидродинамического взаимодействия $F_{пс}$, силы молекулярного притяжения $F_{мп}$.

Электростатическое взаимодействие флотируемой частицы с пузырьком воздуха, поверхность которого, как правило, имеет отрицательный электрический заряд, приводит к возникновению кулоновской силы отталкивания, препятствующей их сближению. Возникновение поверхностного заряда на границе раздела фаз «воздух – жидкость» может быть обусловлено действием различных причин:

1. Вследствие различия диэлектрических свойств дисперсной фазы и дисперсной среды.
2. Под воздействием сил молекулярного притяжения, обеспечивающих избирательную сорбцию ионов и молекул воды из раствора.
3. В результате частичной диссоциации поверхностных молекул на границе раздела фаз.

Образование поверхностного заряда по первому механизму происходит благодаря ориентированию сопряженных фаз в результате их взаимодействия. Согласно правилу Кена, из двух соприкасающихся фаз положительно заряжается та, которая имеет большую диэлектрическую проницаемость [135].

Поскольку вода имеет большую величину диэлектрической проницаемости, то находящиеся в ней дисперсии, как правило, заряжаются отрицательно.

Сущность второго механизма образования поверхностного заряда заключается в избирательной специфической адсорбции на границе раздела фаз ионов одного знака.

По третьему механизму образование поверхностного заряда происходит в результате перехода ионов и электронов с поверхности дисперсной частицы в жидкую фазу (поверхностная ионизация). На границе раздела фаз появляется слой потенциалоопределяющих ионов, вследствие чего частица приобретает поверхностный заряд.

Под действием кулоновских сил в слое жидкости у границы раздела фаз происходит концентрирование ионов, имеющих противоположный знак заряда, компенсирующих поверхностный заряд (ионная атмосфера). В соответствии с теорией строения двойного электрического слоя (с теорией Штерна) [135] слой противоионов состоит из двух частей. Одна его часть образует плотный слой противоионов, толщина которого равна радиусу составляющих его гидратированных ионов и который примыкает непосредственно к поверхности раздела фаз (слой Гельмгольца). Другая часть противоионов находится в диффузной части и образует размытый диффузный слой, имеющий значительную толщину, определяемую свойствами и составом дисперсной системы (слой Гуи). Ионная система покоящейся частицы электронейтральная. В реальности дисперсные частицы находятся в движении, вследствие чего под действием гидродинамических сил происходит «смыв» части диффузного слоя, в результате чего и возникает электрокинетический потенциал ξ (дзета-потенциал). Поскольку флотируемая частица и пузырек воздуха имеют электрокинетический потенциал одного знака, между ними возникает кулоновская сила электростатического отталкивания, величина которой может быть определена по формуле

$$F_{эс} = \pi \xi_u \xi_n \epsilon \chi r_u \frac{\ell^{-\chi h}}{1 + \ell^{-\chi h}}, \text{ Н}, \quad (2.20)$$

где ξ_u и ξ_n – соответственно электрокинетические потенциалы флотируемой частицы и пузырька воздуха, В; ϵ – диэлектрическая проницаемость жидкости, $\text{К}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2)$; r_u – радиус флотируемой частицы, м; χ – параметр Дебая, м^{-1} ; h – расстояние между поверхностями частицы и пузырька воздуха, м.

В процессе флотации безынерционной дисперсной частицы действие отталкивающей кулоновской силы $F_{эс}$ компенсируется действием прижимной силы ближнего гидродинамического взаимодействия $F_{пс}$, которая возникает в экваториальной плоскости пузырька воздуха, где дисперсная частица, движущаяся по линии тока жидкости, приближается к его поверхности. Природа прижимной силы ближнего гидродинамического взаимодействия объясняется асимметричностью характеристик потока, несущего флотируемую частицу, у поверхности пузырька воздуха (рис.2.2).

В соответствии с уравнением Бернулли давление, действующее с наружной стороны частицы P_2 , и давление в зазоре между частицей и пузырьком воздуха P_2 будут не равны друг другу, так как скорость течения жидкости в зазоре $v_{п1}$ больше, чем скорость набегающего потока с наружной стороны пузырька $v_{п2}$, вследствие сужения сечения потока. Величину перепада давления можно определить по формуле

$$\Delta P = \rho_{ж} \frac{\Delta v_{п}^2}{2}, \text{ Па}. \quad (2.21)$$

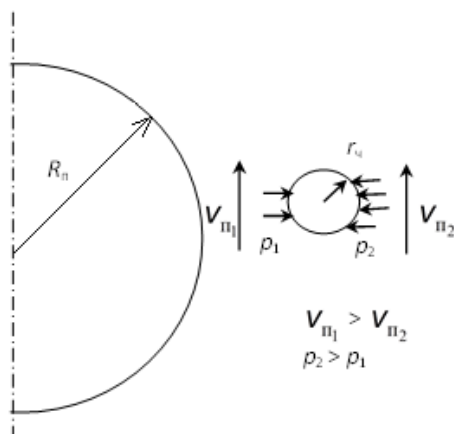


Рис.2.2. Схема ближнего гидродинамического взаимодействия между газовым пузырьком и флотируемой частицей

Таким образом, величина прижимной силы ближнего гидродинамического взаимодействия будет равна:

$$F_{ПС} = \pi r_q^2 \Delta P = \pi r_q^2 \rho_{ж} \frac{v_{п2}^2 - v_{п1}^2}{2}, \text{ Н.} \quad (2.22)$$

В результате использования точного решения уравнения Стокса было получено уравнение, позволяющее определить величину прижимной силы у поверхности пузырька воздуха [115]:

$$F_{ПС} = 6\pi r_q \mu v_{п} f(H), \text{ Н,} \quad (2.23)$$

где $v_{п}$ – скорость всплывания пузырька воздуха, м/с; $f(H)$ – универсальная функция, характеризующая ближнее гидродинамическое взаимодействие в зависимости от величины расстояния между поверхностями пузырька и частицы h , м, и радиуса частицы r_q , м; H – безразмерный параметр, характеризующий положение центра флотируемой частицы в локальной системе координат,

$$H = \frac{h - r_q}{r_q}.$$

Анализ полученных результатов [115] показал, что влияние прижимной силы ближнего гидродинамического взаимодействия начинает сказываться лишь при условии $H < 1$. В этом случае величина нормальной к плоскости поверхности пузырька воздуха силы, прижимающей сферическую частицу, описывается формулой

$$F_{ПС} = 6\pi r_q \mu v_{п} (3,23 - 2,91H + 1,56H^2), \text{ Н.} \quad (2.24)$$

На приближившуюся к поверхности пузырька воздуха под действием прижимной силы на некоторое достаточно малое расстояние h дисперсную частицу начинают действовать силы молекулярного притяжения.

Предположение о существовании силы молекулярного притяжения между двумя поверхностями впервые было высказано в 1873 году голландским ученым Ван-дер-Ваальсом.

В соответствии с современными представлениями считается, что силы молекулярного притяжения включают в себя три составляющие: 1) диполь-дипольное взаимодействие; 2) индукционное взаимодействие; 3) дисперсное притяжение.

Диполь-дипольное (ориентационное) взаимодействие возникает при сближении двух поверхностей, состоящих из полярных молекул, в результате чего они ориентируются таким образом, что положительная сторона диполей на одной поверхности обращается к отрицательной стороне диполей на другой поверхности.

В процессе индукционного взаимодействия диполи воздействуют на неполярные молекулы, превращая их в индуцированные (наведенные) диполи, в результате чего между постоянными и наведенными диполями возникает притяжение. Индукционное взаимодействие двух поверхностей обладает значительно меньшей энергией, чем диполь-дипольное взаимодействие.

Дисперсная составляющая силы молекулярного притяжения возникает вследствие флуктуаций электрической плотности, в результате чего появляются мгновенные диполи у соседних молекул. Появление и распад флуктуаций электрической плотности на взаимодействующих поверхностях происходят синхронно, а движение мгновенных диполей становится согласованным. Дисперсная составляющая является единственно возможным проявлением силы молекулярного притяжения для неполярных молекул.

Величина силы молекулярного притяжения между двумя сферическими частицами в соответствии с рекомендациями определяется по формуле

$$F_{M.П} = \frac{A\pi r_q}{2h^2} \text{ (Н)}, \quad (2.25)$$

где A – постоянная Гамакера ($A=10^{-19}-10^{-20}$ Дж); r_q – радиус частиц, м; h – расстояние между поверхностями частиц, м.

При наличии дисперсной среды константа A в уравнении (2.25) заменяется на величину:

$$A^* = A_1 + A_0 - 2A_{01} \text{ (Дж)}, \quad (2.26)$$

где A_1 и A_0 – соответственно константы Гамакера для дисперсной фазы (вещества частицы) и дисперсной среды (воды); A_{01} – постоянная взаимодействия фазы и среды.

Чем сильнее взаимодействие дисперсной фазы и среды, тем больше величина A_{01} и тем меньше значение A^* , что обуславливает уменьшение силы молекулярного притяжения в дисперсной среде.

Для элементарного акта флотации безынерционной частицы всплывающим в стоксовском режиме пузырьком воздуха в работе [115] рекомендуется определять величину коэффициента эффективности захвата по формуле

$$E = \frac{3}{2} \left(\frac{r_v}{R_n} \right)^2 \quad (2.27)$$

Для режима всплывания пузырька воздуха, отличного от стоксовского, величина коэффициента E определяется по формуле

$$E = \frac{3r_v}{R_n} \quad (2.28)$$

В соответствии с формулами (2.27) и (2.28) эффективный процесс флотационной очистки сточных вод, содержащих эмульсии нефтепродуктов, имеющих размер 5-20 мкм, возможен только при использовании водовоздушных смесей, содержащих пузырьки воздуха диаметром менее 100 мкм. В настоящее время для получения таких водовоздушных смесей широкое распространение получил метод напорной флотации, предусматривающий выделение мелкодисперсных пузырьков воздуха из пересыщенного раствора.

2.2. Теоретические основы процесса образования пузырька воздуха из пересыщенного раствора жидкости

В процессе напорной флотации пересыщенный раствор воздуха в воде создается за счет резкого сброса давления путем дросселирования.

В соответствии с законом Генри количество растворенного газа в жидкости пропорционально его парциальному давлению над раствором. Закон Генри справедлив для относительно небольших давлений (до 2-3 МПа) и может быть описан формулой

$$C = C_0 \frac{P}{P_0}, \text{ кг/м}^3, \quad (2.29)$$

где C – концентрация газа в растворе при давлении P , кг/м³; P – давление газа над раствором, Па; C_0 – растворимость газа в воде при атмосферном давлении $P_0=10^5$ Па, м/м³.

Растворимость газа в воде зависит от физических свойств газа и температуры. Данные по растворимости воздуха в воде представлены в виде табл. 2.1.

Т а б л и ц а 2 . 1

Растворимость воздуха в воде при атмосферном давлении

Температура, С°	Растворимость воздуха в воде, мг/л	Температура, С°	Растворимость воздуха в воде мг/л
10	29,2	40	17,0
20	23,6	50	14,7
30	19,9	60	12,7

Явление образования мелких пузырьков, заполненных паром и выделяющимся из раствора газом при дросселировании потока насыщенной воздухом воды, является, по существу, распространенным в технике процессом кавитации (лат. *cavitas* – пустота).

Процесс кавитации, происходящий в жидкостных потоках, зависит от многих факторов: концентрации растворенных в жидкости газов, наличия ядер кавитации, физико-химических свойств жидкости, гидродинамических характеристик потока и др. В настоящее время достаточно подробно проработаны теоретические вопросы, связанные с процессами паровой кавитации. Очистка сточных вод методом компрессионной флотации обуславливается в основном диффузионными явлениями газовой кавитации. В отличие от паровой кавитации теоретические аспекты, связанные с явлением газовой кавитации, изучены гораздо хуже. Пока имеется ограниченное число работ, посвященных кинетике диффузионных процессов в насыщенных газом потоках жидкости [9, 10].

Актуальными остаются вопросы, связанные с оценкой дисперсного состава и величины счетной концентрации газовых пузырьков, выделяющихся при дросселировании насыщенного газом потока жидкости. С технической точки зрения очень важно избежать или сократить до минимальных значений наблюдаемые при напорной флотации процессы захлопывания и растворения микропузырьков, образующихся при дросселировании потока насыщенной газом жидкости, и вместе с тем необходимо обеспечить условия, предотвращающие коалесценцию растущих пузырьков за счет диффузии растворенного газа.

Теоретические основы процесса выделения газов из пересыщенных растворов в жидкости были описаны в трудах Д. Гиббса [127].

В теории Д. Гиббса были сформулированы следующие основные допущения:

1. Устойчивой считается изолированная система, в которой при любом бесконечно малом изменении ее состояния при постоянстве энергии энтропия остается постоянной или уменьшается.

2. Изолированная система находится в абсолютно устойчивом состоянии, если ее энтропия остается постоянной или уменьшается при любом конечном изменении состояния этой системы.

3. Изолированная система находится в метастабильном (относительно устойчивом) состоянии, если при некоторых конечных изменениях ее состояния энтропия этой системы возрастает.

Примером метастабильной системы может служить поток насыщенной газом жидкости, прошедший дросселирующее устройство. В результате сброса давления такой поток жидкости становится пересыщенным. За счет появления зародышей новой фазы система из метастабильного переходит в стабильное состояние.

Развитие теории возникновения новых фаз в метастабильных системах получило в работах М. Фольгмера, И.Я. Френкиля, О.М. Тодеса, Я.Б. Зельдовича, Б.В. Дерягина [127].

Изменение энергии Гиббса (максимальной работы системы) определяет возможность самопроизвольного протекания процессов фазовых переходов. Величина изменения энергии Гиббса ΔG , Дж, складывается из работы образования объема новой фазы $A_{об}$, Дж, и работы образования новой поверхности раздела фаз $A_{пов}$, Дж.

$$\Delta G_{II} = A_{пов} + A_{об}, \text{ Дж.} \quad (2.30)$$

Изменение энергии Гиббса в процессе образования отдельного газового пузырька

$$\Delta G_{п} = \sigma_{ж.г} S_{п} - \Delta \mu i, \text{ Дж,} \quad (2.31)$$

где $\sigma_{ж.г}$ – коэффициент поверхностного натяжения границы раздела фаз «жидкость-газ», Дж/м²; $S_{п}$ – площадь поверхности пузырька воздуха, м²; i – отношение объема газового пузырька $W_{п}$, м³, к объему одного моля газа W_{μ} , м³ (число молей газа в пузырьке); $\Delta \mu$ – удельное изменение химического

потенциала системы при выделении из раствора одного моля газа, $\frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$.

Подставив в формулу (2.31) величины поверхности и объема пузырька сферической формы радиусом R_n , получим:

$$\Delta G_{II} = 4\pi \left(R_n^2 \sigma_{ж.г} - \frac{\Delta \mu R_n^3}{3W_{\mu}} \right), \text{ Дж.} \quad (2.32)$$

При снижении давления над жидкостью с P_1 (давление насыщения) до давления P_2 (давление в дросселирующем устройстве) она становится пересыщенной и удельное изменение химического потенциала при этом составит:

$$\Delta \mu = RT \ln \frac{P_1}{P_2}, \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}, \quad (2.33)$$

где T – абсолютная температура жидкости, K° ; R – универсальная газовая постоянная $\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot K}$;

тогда:

$$\Delta G_{II} = 4\pi \left(R_n^2 \sigma_{ж.л} - RT \ln \frac{P_1}{P_2} - \frac{\Delta\mu R_n^3}{3W_\mu} \right), \text{ Дж.} \quad (2.34)$$

Взяв первую и вторую производные уравнений (2.32) и (2.33), по R_n можно установить, что функция $\Delta\sigma_n$ имеет максимум при некотором значении $R_{n.кр}$, равном:

$$R_{n.кр} = \frac{2\sigma_{ж.л} W_\mu}{\Delta\mu} = \frac{2\sigma_{ж.л} W_\mu}{RT \ln \frac{P_1}{P_2}}, \text{ м.} \quad (2.35)$$

Этот размер пузырька газа называется критическим, а максимальное значение ΔG_{II} при этом будет:

$$\Delta G_{II.MAX} = \frac{16\pi\sigma_{ж.л} W_\mu^2}{3\Delta\mu^2} = \frac{16\pi\sigma_{ж.л} W_\mu^2}{3 \left(RT \ln \frac{P_1}{P_2} \right)^2}, \text{ Дж.} \quad (2.36)$$

Элементарное приращение энергии Гиббса, связанной с элементарной работой образования объема новой фазы $dA_{об}$ при изменении степени дисперсности в капиллярных процессах при постоянной температуре $T=\text{const}$, может быть представлено в виде:

$$dA_{об} = W_{dp}, \text{ Дж.} \quad (2.37)$$

Для конкретного газа, имеющего объем, равный мольному объему $W=W_\mu$

$$dA_{об} = W_\mu dp \text{ или } \Delta A_{об} = W_\mu \Delta P, \text{ Дж.} \quad (2.38)$$

В соответствии с законом Лапласа для сферического газового пузырька

$$\Delta P = \frac{2\sigma_{ж.л}}{R_{n.кр}}, \text{ Па,} \quad (2.39)$$

тогда

$$\Delta A_{об} = \frac{2\sigma_{ж.л} W_\mu}{R_{n.кр}}, \text{ Дж.} \quad (2.40)$$

Для процесса перехода вещества из растворенной формы в газообразную энергию Гиббса, связанную с работой образования объема новой фазы,

можно выразить через давление насыщенного пара, приняв его за идеальный газ. Тогда величина дополнительного изменения энергии Гиббса, связанного с изменением дисперсного состояния системы, определяется следующим образом:

$$\Delta A_{об} = RT \ln \frac{P_{НПИ}}{P_{НПО}}, \text{ Дж}, \quad (2.41)$$

где $P_{НПИ}$ и $P_{НПО}$ – соответственно величины давления насыщенного пара над искривленной поверхностью образовавшегося пузырька газа и ровной поверхностью раздела фаз «газ – жидкость», Па.

Приравнивая (2.40) и (2.41), имеем:

$$\frac{2\sigma_{жг}W_{\mu}}{R_{п.кр}} = RT \ln \frac{P_{НПИ}}{P_{НПО}}, \text{ Дж}. \quad (2.42)$$

Из (2.42) может быть получено уравнение Кельвина – Томсона:

$$\ln \frac{P_{нпи}}{P_{нпо}} = \frac{2\sigma_{жг}W_{\mu}}{RTR_{п.кр}}, \text{ Дж}. \quad (2.43)$$

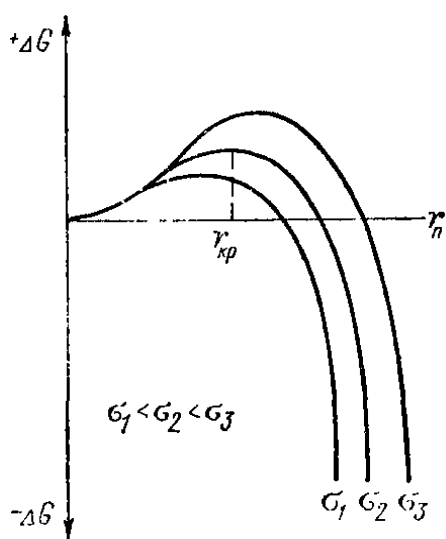


Рис.2.3. Графики зависимостей величины изменения энергии Гиббса $\Delta G_{п}$ в процессе образования пузырька газа из пересыщенного раствора и размера радиуса $R_{п}$ при разной величине коэффициента поверхностного натяжения $\sigma_{жг}$ на границе раздела фаз «жидкость – газ»

На рис.2.3 приведены графики зависимости величины изменения энергии Гиббса $\Delta \sigma_{жг}$ в процессе образования пузырька газа из пересыщенного раствора от размера его радиуса $R_{п}$.

В соответствии с графиками, приведенными на рис. 2.3, при $R_{п} < R_{пкр}$ процесс идет с увеличением энергии $\Delta G_{п}$. В этом случае образовавшийся зародыш пузырька газа нестабилен и снова растворяется в жидкости. В случае, когда $R_{п} > R_{пкр}$, происходит самопроизвольный рост пузырька газа, сопровождающийся уменьшением энергии Гиббса $\Delta G_{п}$.

Условием выделения новой фазы из раствора газа в жидкости является не только превышение химического потенциала выделяющегося вещества в старой фазе над его химическим потенциалом в новой фазе, но и преодоление сил поверхностной энергии. В связи с этим, несмотря на наличие пересыщения, протекание процесса образования новой фазы сильно замедляется ввиду наличия энергетического барьера. Для образования новой фазы необходимо, чтобы из-за флуктуации концентраций растворенного газа в некотором локальном объеме произошло скопление достаточно большого числа

молекул новой фазы. Наличие в растворе центров образования (микровключений), аналогичных центрам конденсации или кристаллизации существенно интенсифицирует процесс образования новой фазы. Выделившиеся из пересыщенного раствора зародышевые пузырьки начинают быстро расти за счет процесса диффузии в них растворенного газа до того момента, пока пересыщение не исчезнет.

Таким образом, процесс выделения газовых пузырьков из пересыщенного раствора в жидкости протекает в две стадии: стадии образования зародышевых пузырьков газа и стадии их роста вследствие диффузии в них растворенного газа. Первая из этих стадий протекает с увеличением энергии Гиббса в системе, и поэтому термодинамика затруднена. Вторая стадия образования газовых пузырьков идет самопроизвольно со значительным убыванием энергии Гиббса.

В случае, когда образовавшийся вследствие местных флуктуаций концентраций растворенного газа пузырек воздуха имеет радиус $R_{п}$, меньший некоторого критического размера $R_{пкр}$ при данном пересыщении среды, он снова растворяется в жидкости и не дает начала росту нового пузырька.

С повышением температуры и ростом степени пересыщения жидкости газом вероятность возникновения зародыша газового пузырька увеличивается.

Как следует из формул (2.35) и (2.42), величина критического размера зародыша пузырька газа $R_{пкр}$ является функцией относительных давлений:

$$\bar{p} = \frac{P_1}{P_2} \text{ и } \bar{P}_{нп} = \frac{P_{нпн}}{P_{нпо}},$$

причем

$$\bar{p} = \bar{P}_{нп}, \text{ Па.} \quad (2.44)$$

Таким образом, величина отношения давления, при котором произошло насыщение жидкости газом P_1 , к давлению жидкости после дросселирования P_2 , при котором образуются зародыши пузырьков газа критического размера $R_{пкр}$, равна величине отношения давления насыщенного пара над искривленной поверхностью $P_{нпн}$ внутри образовавшегося зародыша пузырька газа критического размера $R_{пкр}$ к давлению насыщенного пара над ровной поверхностью раздела фаз «газ – жидкость» $P_{нпо}$.

В работе [103] рекомендуется определять величину критического размера газового пузырька (размер зародышевого пузырька) исходя из анализа действующих на него сил (закона Лапласа) на формуле

$$R_{п.кр} = \frac{2\sigma_{жг}}{P_1 - P_2}, \text{ м.} \quad (2.45)$$

Вычисленные по формуле (2.45) критические размеры зародышевых пузырьков при перепаде давлений $\Delta P = 10^5 - 10^6$ Па составляют $10^{-6} - 10^{-7}$ м. Пузырьки такого масштаба будут содержать $10^5 - 10^8$ молекул газа (пара).

На рис.2.4 представлены графики зависимостей величин критических размеров зародышей пузырьков газа, вычисленных по формуле (2.34) от значений относительного перепада давлений $\bar{p} = \frac{P_1}{P_2}$ при температуре $T = 293$ °К и разной величине коэффициента поверхностного натяжения $\sigma_{жг}$.

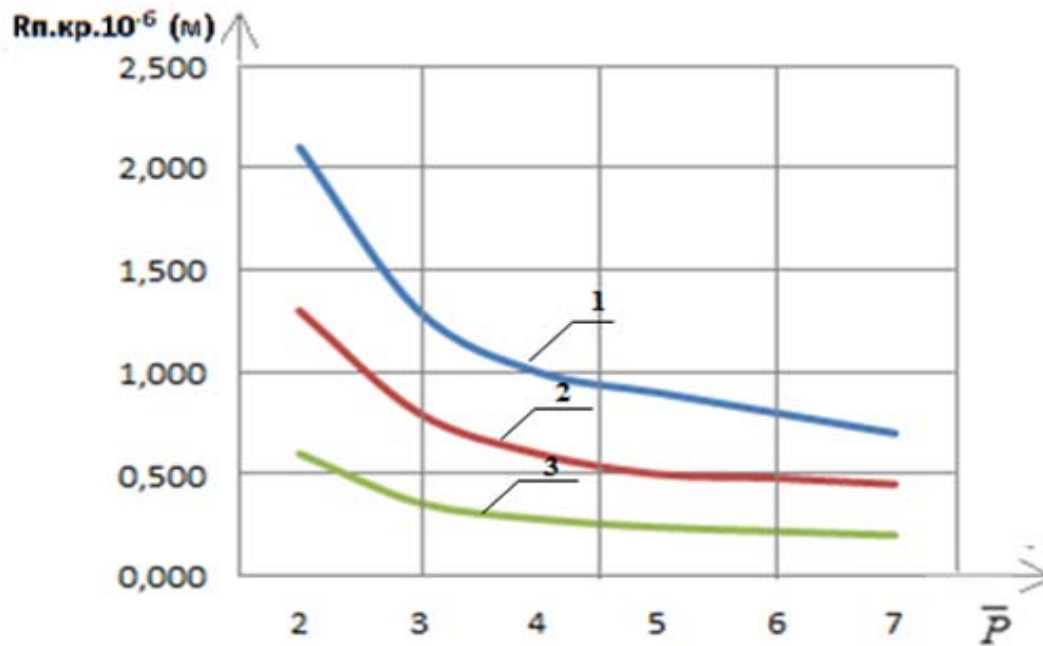


Рис.2.4. Графики зависимостей величин критических размеров зародышей пузырьков газа, вычисленных по формуле (2.34), от значений относительного перепада давлений $\bar{p} = \frac{P_1}{P_2}$ при температуре $T = 293$ К и разной величине

коэффициента поверхностного натяжения $\sigma_{жг}$:

$$1 - \sigma_{жг} = 0,073 \text{ Дж/м}^2; 2 - \sigma_{жг} = 0,045 \text{ Дж/м}^2; 3 - \sigma_{жг} = 0,02 \text{ Дж/м}^2$$

В соответствии с существующей в настоящее время теорией процесса образования новой фазы принято вычислять величину вероятности формирования жизнеспособного зародыша новой фазы на основе рассмотрения марковской цепи событий, ведущей от молекулярного уровня к макроскопическому, то есть возникновению зародыша пузырька.

Зельдовичу Я.Б. [58] удалось описать «поток зародышей» в пространстве и определить их размеры. Для одного частного случая (когда число мономерных молекул во много раз превышает количество молекулярных комплексов) он использовал метод перевала и выразил число «равновесных» критических зародышей через число молекул с тем, чтобы с помощью уравнений Крамерса – Фокера – Планка [127] описать величину этого «потока

зародышей». Было получено уравнение, позволяющее оценить величину вероятности возникновения зародыша в единице объема пересыщенной жидкости в единицу времени:

$$\chi = \frac{2W \sqrt{T \cdot \sigma_{жсг}}}{\mu d^4 R_{ПКР}} \cdot \ell \cdot \frac{16\pi\sigma_{жсг}^3 W_{\mu}^2}{3RT \ln \frac{P_1}{P_2}}, \quad (2.46)$$

где W – объем пересыщенной жидкости, м³; d – диаметр молекул жидкости, м; μ – динамический коэффициент вязкости жидкости, Па·С.

В соответствии с предложенной в работе [58] моделью зародыш пузырька образуется за промежуток времени, который имеет порядок 10⁻¹² с, то есть практически мгновенно, а число зародышей, образующихся в единице объема пересыщенной жидкости в единицу времени, определяется формулой

$$\Delta N_n = \frac{BD}{R_{нкр}^4} \sqrt{\frac{8\pi\sigma_{жсг}}{RT}}, \quad \frac{\text{шт}}{\text{с} \cdot \text{м}^3}, \quad (2.47)$$

где B – коэффициент, характеризующий равновесное распределение зародышей по размерам; D – аналог коэффициента диффузии, м²/с.

В работе [109] утверждается, что на скорость образования газовой фазы из пересыщенной жидкости в существенной степени влияют гидродинамические условия потока этой жидкости. Увеличение скорости потока пересыщенной жидкости приводит к уменьшению размеров образовавшихся пузырьков газа и к увеличению их числа. Повышение скорости образования новой фазы в этом случае может быть объяснено ускорением протекания процессов диффузии газа за счет повышения турбулентности потока. Воздействие повышенной турбулентности объясняется автором работы [127] механизмом формирования зародыша пузырька в центре свободного вихря, возникающего в турбулентном потоке, при наличии условий для протекания кавитационных явлений. Подобный механизм действует и в процессе возникновения кавитационных образований в пограничном слое жидкости.

В работе [127] была предпринята попытка количественной оценки процесса образования жизнеспособных зародышей пузырьков в центре свободных турбулентных вихрей, согласно которой число этих зародышей в единице объема жидкости определяется выражением

$$N_n = \frac{4 \cdot 10^5 (u')^{1.5}}{\nu^{1.5} \ell_0^{1.5}} \cdot \left[1 - \left(\frac{u_{кр}}{u} \right)^{0.75} \right]^2, \quad \frac{\text{шт}}{\text{с} \cdot \text{м}^3}, \quad (2.48)$$

где u – скорость потока жидкости, м/с; u' – среднеквадратичное значение компоненты турбулентных пульсаций скорости (для сильнотурбулизованных струй $u' = 0,015-0,20 u$; ν – кинематический коэффициент вязкости

жидкости, $\text{м}^2/\text{с}$; l_0 – размер сопла, м ; $u_{\text{кр}}$ – критическая скорость, при которой пузырьки не образуются ($u_{\text{кр}} = 7,0 \text{ м/с}$).

Автором работы [127] было проведено экспериментальное изучение характеристик дисперсного состава пузырьков воздуха, образующихся при дросселировании пересыщенной воды.

Дисперсный состав образующихся пузырьков воздуха изучался с помощью метода фотографирования оптической системой с малой глубиной резкости. Исследования проводили на водопроводной воде, насыщенной воздухом при давлениях 200, 300, 400, 500 и 600 кПа. Температура воды 15°C . Дросселирование пересыщенной воды осуществлялось путем пропускания ее через латунную диафрагму толщиной 0,3 мм с диаметром отверстий 0,6, 1,03, 1,6 мм. Высота используемой прозрачной колонки составляла 500 мм. Фотографирование водовоздушной смеси в колонке производилось на высоте 300 мм от диафрагмы. Полученные микрофотографии обрабатывались, и строились графики функции распределения пузырьков по крупности, представленные на рис.2.5.

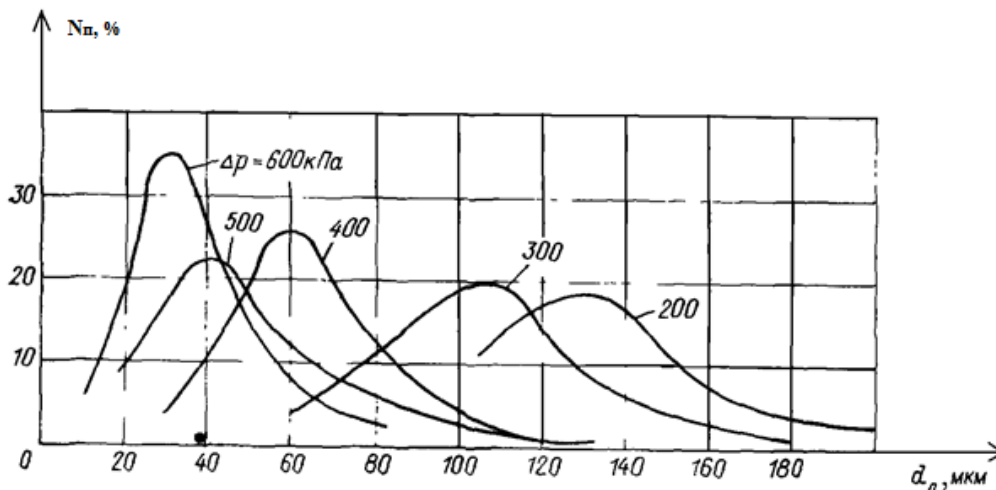


Рис.2.5. Графики распределения пузырьков воздуха по крупности при различных перепадах давлений ΔP (по данным [127])

По пути движения газожидкостной смеси, как показывают исследования [127], ее относительное объемное содержание и дисперсный состав подвержены значительным изменениям вследствие продолжающихся процессов диффузии газа и интенсивной коалесценции пузырьков воздуха. Ввиду недостаточной длительности периода образования водовоздушной смеси в работе [127] приведены данные, характеризующие дисперсный состав пузырьков воздуха не закончивших процесс своего формирования, эти данные существенно отличаются от результатов, представленных в работе [52].

На рис.2.6 приведены результаты исследований распределения пузырьков азота по размерам при дросселировании его раствора в воде с различным начальным пересыщением [52].

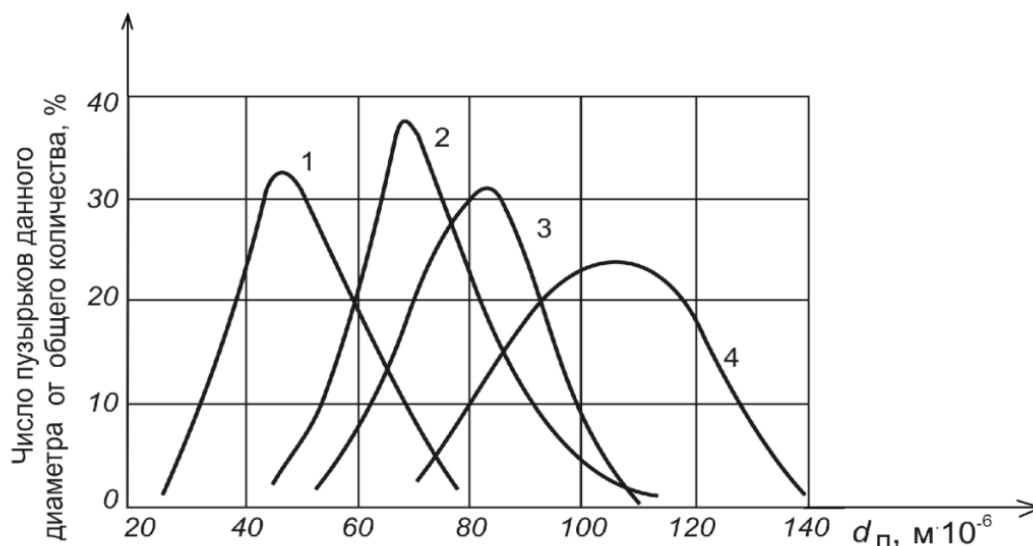


Рис.2.6 Графики распределения пузырьков азота по крупности в зависимости от величины пересыщения жидкости:
1 – 200 %; 2 – 400 %; 3 – 500 %; 4 – 800 %

Полученные данные показывают, что увеличение исходного пересыщения раствора приводит как к увеличению относительного объемного содержания газа в смеси, так и к существенному росту величины среднего диаметра газовых пузырьков. Повышенные концентрации растворенного в жидкости газа при большой величине ее пересыщения обуславливают существенное увеличение объема образовавшегося пузырька вследствие интенсивного протекания процесса диффузии газа и слипания (коалесценции) образовавшихся пузырьков.

Величина удельного газонакопления газожидкостной смеси объемом $W_{см} = 1 \text{ м}^3$ может быть определена как:

$$\varphi = \frac{W_z}{W_{см}} = W_z. \quad (2.49)$$

Объем сферического пузырька воздуха в газожидкостной смеси со средним диаметром d_n , м:

$$W_n = \frac{\pi d_n^3}{6}, \text{ м}^3 \quad (2.50)$$

При числе пузырьков воздуха диаметром d_n в единице объема газожидкостной смеси N_n

$$\varphi = \frac{\pi d_n^3}{6} N_n, \quad (2.51)$$

$$N_n = \frac{6\varphi}{\pi d_n^3} \cdot \frac{\text{шт}}{\text{м}^3}. \quad (2.52)$$

Число пузырьков воздуха в единице объема газожидкостной смеси N_n прямо пропорционально величине коэффициента газонаполнения φ и обратно пропорционально кубу среднего диаметра газовых пузырьков d_n .

Таким образом, повышение давления в сатураторе позволит увеличить степень пересыщения воды воздухом, что приведет, с одной стороны, к росту величины газонаполнения, получаемой в процессе дросселирования водовоздушной смеси, а с другой – к увеличению размеров образовавшихся пузырьков воздуха. Возрастание величины газонаполнения положительно влияет на эффективность процесса напорной флотации. Увеличение среднего диаметра образующихся пузырьков воздуха d_n приведет к уменьшению их числа N_n и снижению величины эффективности захвата E (формула (2.27)), что обуславливает снижение эффективности напорной флотации. Влияние факторов повышения величины газонаполнения водовоздушной смеси и увеличения средних размеров образующихся пузырьков приведет к тому, что эффективность процесса напорной флотации будет иметь максимум при некотором определенном значении пересыщения жидкости [11,16].

Феномен снижения эффективности процесса безреагентной напорной флотационной очистки замазученных сточных вод в радиальном флотационном отстойнике при увеличении давления в напорном баке более $2,5 \text{ кг/см}^2$ описывается в работе [146] (рис.2.7).

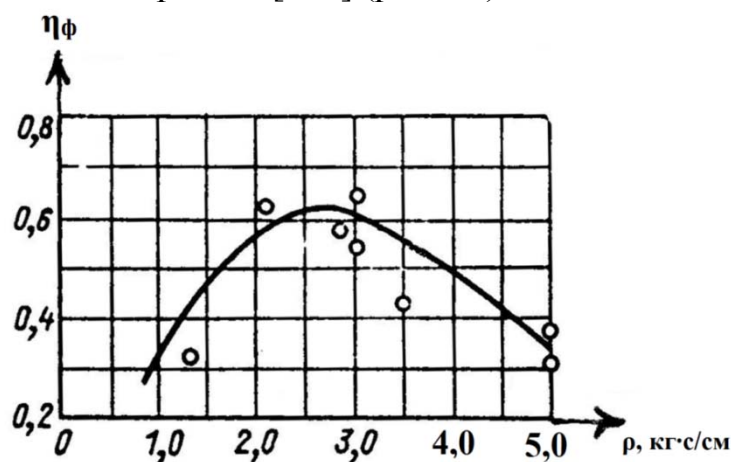


Рис.2.7. Зависимость эффективности очистки воды методом безреагентной напорной флотации от давления в сатураторе (по данным [146])

Проведенный анализ процессов образования пузырьков воздуха из пересыщенного раствора жидкости позволяет сделать вывод, что технология напорной флотации, широко используемая в настоящее время для очистки сточных вод, не позволяет получить тонкодисперсную водовоздушную смесь с высоким газонаполнением.

2.3. Теоретические основы процесса механического диспергирования водовоздушной смеси

В процессе механического диспергирования водовоздушной смеси уменьшение размеров находящихся в ней пузырьков воздуха происходит по двум механизмам: 1) при взаимном столкновении пузырьков воздуха; 2) в результате воздействия на пузырьки воздуха микровихрей, образующихся в турбулентном потоке.

Взаимные столкновения пузырьков воздуха в турбулентном потоке водовоздушной смеси может привести к следующим результатам:

1. В процессе столкновения двух воздушных пузырьков происходит их дробление, вследствие чего их суммарный объем не изменяется ($\sum W_{п} = \text{const}$), а суммарная площадь поверхности увеличивается ($\sum S_{п1} < \sum S_{п2}$).

2. Столкновение пузырьков воздуха в водовоздушной смеси заканчивается их слиянием (коалесценцией), в результате чего их суммарный объем не изменяется ($\sum W_{п} = \text{const}$), а суммарная площадь поверхности уменьшается ($\sum S_{п1} > \sum S_{п2}$).

3. В водовоздушной смеси происходит упругое столкновение пузырьков, вследствие чего их суммарный объем не изменяется ($\sum W_{п} = \text{const}$), а их суммарная площадь также остается постоянной ($\sum S_{п} = \text{const}$).

В результате многочисленных актов столкновений пузырьков в водовоздушной смеси каждый из них приобретает конкретные параметры (диаметр пузырька d_{ni} , избыточное давление внутри пузырька ΔP_{ni} и величину коэффициента поверхностного натяжения σ_{ni}), обеспечивающие в дальнейшем протекание процесса столкновения по упругому механизму и остающиеся впоследствии неизменными.

Изменением степени дисперсности пузырьков воздуха во времени в потоке водовоздушной смеси в результате их коалесценции, в частности, может быть объяснено расхождение данных, представленных на рис. 2.5 и 2.6.

Определить параметры пузырьков, позволяющие им сталкиваться по упругому механизму, можно проведя анализ удельных энергетических характеристик гипотетического пузырька воздуха строго сферической формы объемом один моль, находящегося в покое в слое воды на достаточно малой глубине, позволяющей пренебречь величиной гидростатического давления. При температуре воды $T = 293,15$ К объем этого пузырька воздуха будет составлять $W_{n\mu} = 0,0241$ м³. Диаметр этого пузырька

$$d_{n\mu} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot W_{n\mu}}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 0,0241}{3,14}} = 0,358. \quad (2.53)$$

Принимается, что величина коэффициента поверхностного натяжения у рассматриваемого пузырька воздуха равна величине коэффициента поверхностного натяжения неискривленной границы раздела фаз «вода – воздух»

при температуре $T = 293,15$ К, $\sigma_{жг} = 0,0726$ Дж/м². Тогда величину избыточного давления внутри пузырька воздуха, возникающего в результате действия силы поверхностного натяжения, в соответствии с законом Лапласа можно определить как

$$\Delta P_{n\mu} = \frac{4\sigma_{жг}}{d_{n\mu}} = \frac{4 \cdot 0,0726}{0,358} = 0,811 \text{ Па.} \quad (2.54)$$

Для рассматриваемого гипотетического пузырька воздуха будет соблюдаться равенство величин поверхностной механической энергии пузырька $E_{s\mu}$; объемной механической энергии $E_{w\mu}$ и энергии увеличения химического потенциала системы вследствие изменения степени дисперсности E_{μ} (образования пузырька воздуха объемом 1 моль) [8]:

$$E_{s\mu} = E_{w\mu} = E_{\mu}, \text{ Дж,} \quad (2.55)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{s\mu} = \pi_{\Pi\mu}^2 \sigma_{жг} = 3,14 \cdot 0,358^2 \cdot 0,0726 = 0,029 \text{ Дж/моль,} \\ E_{s\mu} = \frac{3}{2} \Delta P_{\Pi\mu} W_{\mu} = \frac{3}{2} \cdot 0,811 \cdot 0,0241 = 0,029 \text{ Дж/моль,} \\ E_{\mu} = RT \ln \frac{P_{НПИ}}{P_{НПО}} = 8,31 \cdot 293,15 \cdot \ln 1,000012 = 0,029 \text{ Дж/моль,} \end{array} \right. \quad (2.56)$$

где R – универсальная газовая постоянная, $R=8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$; $P_{НПИ}$ и $P_{НПО}$ – соответственно давление насыщенного пара над искривленной поверхностью пузырька и ровной поверхностью границы раздела фаз «вода – воздух», Па.

Сферический пузырек воздуха диаметром $d_{n\mu}$ диспергируется на N_{Π} сферических пузырьков диаметром d_n . Количество образовавшихся пузырьков определится из условия

$$W_{n\mu} = N_n W_n, \text{ м}^3, \quad (2.57)$$

тогда

$$N_{\Pi} = \frac{W_{\Pi\mu}}{W_{\Pi}} = \frac{\pi d_{\Pi\mu}^3}{6} \cdot \frac{6}{\pi d_{\Pi}^3} = \frac{d_{\Pi\mu}^3}{d_{\Pi}^3}, \text{ шт.} \quad (2.58)$$

Суммарная площадь поверхности вновь образовавшихся пузырьков:

$$\sum_{i=1}^{\Pi} S_{\Pi i} = N_{\Pi} \pi d^2 = \frac{d_{\Pi\mu}^3}{d_{\Pi}^3} \cdot \pi d_{\Pi}^2 = \pi d_{\Pi\mu}^2 \cdot \frac{d_{\Pi\mu}}{d_{\Pi}} = \pi d_{\Pi\mu}^2 \cdot K_{uo}, \text{ м}^2, \quad (2.59)$$

где $K_{uo} = \frac{d_{\Pi\mu}}{d_{\Pi}}$ – коэффициент, характеризующий изменение степени дисперсности системы.

Поскольку в результате диспергирования величина поверхностной механической энергии не изменяется, то будет выполняться равенство

$$\pi \cdot d_{n\mu}^2 \cdot \sigma_{жсг} = N_n \cdot \pi d_n^2 \cdot \sigma_n = \pi \cdot d_{n\mu}^2 \cdot \frac{d_{П\mu}}{d_{П}} \cdot \sigma_{п}, \text{ Дж}, \quad (2.58)$$

где $\sigma_{п}$ – коэффициент поверхностного натяжения образовавшихся в результате диспергирования пузырьков воздуха ($\text{Дж}/\text{м}^2$).

Откуда

$$\sigma_n = \pi d_{П\mu}^2 \sigma_{жсг} \frac{d_{П}}{d_{П\mu}} \frac{1}{\pi d_{П\mu}^2} = \sigma_{жсг} \frac{d_{П}}{d_{П\mu}} = \frac{\sigma_{жсг}}{K_{уд}}, \text{ Дж}/\text{м}^2. \quad (2.59)$$

Из условия равенства объемной механической энергии исходного пузырька воздуха и суммарной объемной механической энергии вновь образовавшихся в процессе диспергирования пузырьков воздуха с учетом равенства их объемов $W_{n\mu} = \sum_{i=1}^n W_{ni}$ следует, что величина избыточного давления

внутри пузырька воздуха диаметром d_n , возникшего в результате действия силы поверхностного натяжения, также останется неизменной:

$$\Delta P_n = \frac{4\sigma_{П}}{d_{П}} = \frac{4}{d_{П}} \sigma_{жсг} \frac{d_{П}}{d_{П\mu}} = \frac{4\sigma_{жсг}}{d_{П\mu}} = 0,811 \text{ Па}, \quad (2.60)$$

$$\Delta P_{n\mu} = \Delta P_n = \text{const} = 0,811 \text{ Па}. \quad (2.61)$$

Увеличение поверхности раздела фаз «вода – воздух», происходящее в процессе дробления пузырьков, компенсируется снижением величины коэффициента поверхностного натяжения $\sigma_{\mu} = \sigma_{жг}$, $\frac{d_{П}}{d_{\mu}}$, в результате чего величина избыточного давления внутри пузырька воздуха ΔP_n остается неизменной.

Таким образом, величину избыточного давления внутри пузырька воздуха $\Delta P_n = \Delta P_{n\mu} = \text{const} = 0,811 \text{ Па}$ можно считать энергетически наиболее оптимальной, обеспечивающей столкновение пузырьков по упругому механизму. В случае если избыточное давление внутри пузырьков воздуха будет больше оптимального, то они будут склонны к дроблению, приводящему к увеличению суммарной площади поверхности вновь образующихся пузырьков, что приведет при неизменной величине коэффициента поверхностного натяжения к уменьшению избыточного давления ΔP_n . Если избыточное давление внутри пузырьков воздуха будет меньше оптимального, то они будут склонны к коалесценции (слиянию), в результате чего произойдет уменьшение их суммарной площади поверхности, что обеспечит повышение избыточного давления ΔP_n .

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что энергетически оптимальной величиной избыточного давления внутри пузырьков воздуха в движущейся в турбулентном режиме водовоздушной смеси, позволяющей обеспечить процесс их столкновения по упругому механизму, является значение избыточного давления, создаваемого силой поверхностного натяжения внутри гипотетического пузырька воздуха сферической формы, имеющего объем, равный объему одного моля, и коэффициент поверхностного натяжения, равный коэффициенту поверхностного натяжения неискривленной границы раздела фаз «вода – воздух».

Полная удельная поверхностная энергия E_{sy} (Дж/м²) рассматриваемого пузырька воздуха объемом $W_{пц} = 1$ моль в соответствии с рекомендациями [8] может быть определена как сумма удельной энергии поверхностного натяжения $\sigma_{жг}$ (Дж/м²) (поверхностной механической энергии) и удельной энергии скрытой теплоты образования поверхности раздела фаз «вода – воздух» G_s (Дж/м²):

$$E_{sy\mu} = \frac{E_{s\mu}}{S_{пц}} = \sigma_{жг} + G_s = \sigma_{жг} + T^\circ S_T, \text{ Дж/м}^2, \quad (2.62)$$

где $E_{s\mu}$ – полная поверхностная энергия пузырька объемом 1 моль; $S_{пц}$ – площадь поверхности пузырька воздуха объемом 1 моль; T – температура воды К; S_m – температурный коэффициент ($S_m = 0,000155$ Дж/м² при $T = 293,15$ К), $\sigma_{жг} = 0,0726$ Дж/м².

$$E_{sy\mu} = 0,0726 + 293,15 \cdot 0,000155 = 0,118 \text{ Дж/м}^2. \quad (2.63)$$

При уменьшении диаметра пузырька воздуха в процессе диспергирования величина избыточного давления внутри пузырька остается неизменной ($\Delta P_n = \text{const}$), а величина удельной поверхностной энергии σ_n в соответствии с законом Лапласа уменьшается прямо пропорционально уменьшению его диаметра:

$$\sigma_n = \frac{\Delta P_n \cdot d_n}{4}, \text{ Дж/м}^2. \quad (2.64)$$

Поскольку величина удельной поверхностной энергии (Дж/м²) пузырька воздуха диаметром d_n , образовавшегося в процессе диспергирования, также остается неизменной ($E_{syn} = E_{sy\mu} = \text{const}$), снижение значения удельной поверхностной энергии σ_n компенсируется энергией электростатического заряда G_3 (образованием двойного электрического слоя) пузырька при уменьшении его диаметра [146].

Образование двойного электрического слоя на поверхности пузырька воздуха происходит самопроизвольно в результате стремления системы сохранить величину полной удельной поверхностной энергии E_{syn} (Дж/м²).

В соответствии с обобщенным уравнением первого и второго начал термодинамики (без учета химической энергии) изменение величины полной энергии (энергии Гиббса) на поверхности пузырька воздуха dE_n можно записать следующим образом:

$$dE_n = \sigma_n d_s S - S_T dT + \varphi dq, \text{ Дж}, \quad (2.65)$$

где S_m – энтропия системы $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{К}}\right)$; T – температура (К); φ – электрический потенциал двойного электрического слоя (В); q – заряд поверхности (К).

В этом уравнении $\sigma_n d_s S$ обозначает величину изменения поверхностной энергии при изменении площади раздела фаз «вода – воздух». При постоянной температуре зависимость примет вид:

$$dE_n = \sigma_n d_s S + \varphi dq, \text{ Дж}. \quad (2.66)$$

Полный дифференциал поверхностной энергии равен :

$$dE_n = \sigma_n d_s S + S d\sigma_n + \varphi dq + q d\varphi, \text{ Дж}. \quad (2.67)$$

Вычитая уравнение (2.66) из уравнения (2.67), получим:

$$S d\sigma_n + q d\varphi = 0, \text{ Дж}. \quad (2.68)$$

Если разделить полученное соотношение на площадь поверхностного слоя границы раздела фаз «вода – воздух» S и обозначить $q_s = \frac{q}{S}$ (q_s – заряд единицы поверхности, то есть плотность заряда), то получим:

$$\frac{d\sigma_n}{d\varphi} = -q_s, \text{ К/м}^2. \quad (2.69)$$

Соотношение (2.69) носит название первого уравнения Липпмана. Из этого уравнения следует, что если знаки потенциала и заряда совпадают, то уменьшение величины поверхностного натяжения сопровождается увеличением абсолютного значения электрического потенциала.

Дифференциальная емкость двойного электрического слоя, границы раздела фаз «вода – воздух», как и любого конденсатора, определяется соотношением

$$C_s = \frac{dq_s}{d\varphi}, \text{ Ф/м}^2, \quad (2.70)$$

где C_s – удельная электрическая емкость поверхности раздела фаз (Ф/м²).

После дифференцирования уравнения (2.69) и подставки в него соотношения (2.70) можно получить второе уравнение Липпмана:

$$\frac{d^2\sigma_n}{d\varphi^2} = -\frac{dq_s}{d\varphi} = -C_s, \text{ Ф/м}^2. \quad (2.71)$$

Уравнение (2.71) показывает возможность определения емкости двойного электрического слоя, если известна зависимость σ_{Π} от φ .

Если представить двойной электрический слой как плоский конденсатор, тогда его интегральную емкость можно принять как постоянную величину, равную:

$$C_s = \frac{q_s}{\varphi}, \text{ Ф/м}^2. \quad (2.72)$$

В уравнении (2.71) электрическая емкость относится к единице площади поверхности, берется плотность заряда q_s , так как можно предположить, что емкость двойного электрического слоя не зависит от величины потенциала. Подставляя в уравнение (2.69) величину $q_s = C_s \varphi$, полученную из (2.72), имеем

$$\frac{d\sigma_{\Pi}}{d\varphi} = -C_s \varphi, \text{ К/м}^2, \quad (2.73)$$

$$d\sigma_{\Pi} = -C_s \varphi d\varphi, \text{ Дж/м}^2. \quad (2.74)$$

Интегрируем уравнения (2.73) и (2.74) в пределах от σ_{Π} до $\sigma_{\Pi \max}$ (максимальное значение σ) и от φ до φ_0 (заряд φ_0 равен нулю – точка нулевого заряда)

$$\int_{\sigma_{\Pi}}^{\sigma_{\Pi \max}} d\sigma_{\Pi} = -C_s \int_{\varphi}^{\varphi_0} \varphi d\varphi,$$

$$\sigma_{\Pi \max} - \sigma_{\Pi} = C_s \left(\frac{\varphi^2}{2} - \frac{\varphi_0^2}{2} \right), \text{ Дж/м}^2; \quad (2.75)$$

учитывая, что $\varphi_0 = 0$, получим:

$$\sigma_{\Pi \max} = \sigma_{\Pi} + C_s \frac{\varphi^2}{2}, \text{ Дж/м}^2. \quad (2.76)$$

Уравнение (2.76) называется уравнением электрокапиллярной кривой, из которого следует, что величина поверхностного натяжения при условии постоянства емкости двойного электрического слоя изменяется в соответствии с уравнением параболы (рис.2.8).

Вершина параболы отвечает максимальной величине коэффициента поверхностного натяжения $\sigma_{\Pi \max}$ при $\varphi = 0$. Парабола симметрична, что по физическому смыслу означает равное сродство катионов и анионов, выступающих в роли противоионов, к поверхности, имеющей соответственно отрицательный и положительный потенциал. Увеличение как положительного, так и отрицательного потенциала ведет к снижению величины коэффициента поверхностного натяжения.

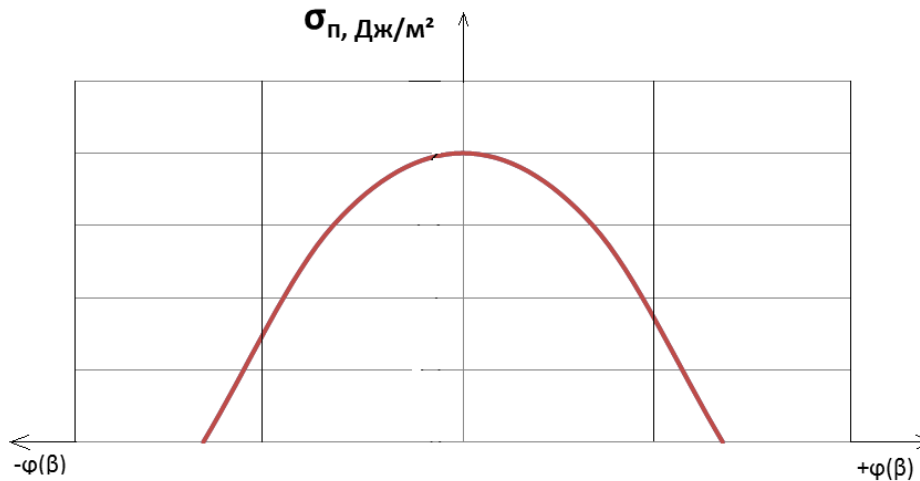


Рис.2.8. График теоретической зависимости величины коэффициента поверхностного натяжения $\sigma_{п}$ (Дж/м²) от величины электрического потенциала двойного электрического слоя ϕ (В) (теоретическая электрокапиллярная кривая)

В реальных водных дисперсных системах электрокапиллярные кривые обычно не являются симметричными. Поверхность раздела фаз «вода – воздух» в большей степени склонна к приобретению отрицательного электрического потенциала.

Величина удельной поверхностной энергии электростатического заряда пузырька воздуха $G_{э}$ может быть определена как:

$$G_{э} = \phi q_s = C_s \frac{\phi^2}{2}, \text{ Дж/м}^2. \quad (2.78)$$

Величина полной удельной поверхностной энергии пузырька воздуха диаметром d_n , образовавшегося в процессе диспергирования в чистой воде, может быть вычислена по формуле

$$E_{syn} = \sigma_{п} + G_s + G_{э} = \sigma_{п} + TS_m + C_s \frac{\phi^2}{2} = 0,118 = \text{const}, \text{ Дж/м}^2. \quad (2.79)$$

Для воды, загрязненной поверхностно-активными веществами, в балансе полной удельной поверхностной энергии пузырька воздуха диаметром d_n необходимо дополнительно учитывать и химическую энергию адсорбированных на его поверхности веществ G_{μ} [103].

$$\Delta G_{\mu} = \sum_{i=1}^n \mu_i N_i, \text{ Дж/м}^2. \quad (2.80)$$

где μ_i – химический потенциал i -го компонента поверхностно-активных веществ (Дж/моль); N_i – число молей i -го компонента ПАВ, адсорбированных на единице площади поверхности пузырька воздуха (моль/м²).

Тогда

$$E_{syn} = \sigma_{п} + G_s + G_{э} + G_{\mu} = \sigma_{п} + TS_m + C_s \frac{\phi^2}{2} + \sum_{i=1}^n \mu_i N_i = 0,118 = \text{const}, \text{ Дж/м}^2. \quad (2.81)$$

В турбулентном потоке водовоздушной смеси наблюдается активное перемешивание находящихся в ней пузырьков воздуха, что определяет протекание процессов диспергирования. По физическому механизму процессы, протекание которых ускоряется в результате перемешивания, принято подразделять на две основные группы [77].

Первую из них составляют процессы переноса растворенных веществ, взвешенных частиц и теплоты на расстояния, не слишком малые по сравнению с размерами аппарата. Эти процессы играют основную роль при смешивании взаиморастворимых жидкостей, взвешивании дисперсных частиц, выравнивании температур. Их результат характеризуется степенью однородности полей концентраций и температур или временем достижения заданной степени однородности и полностью определяется макромасштабными характеристиками потока жидкости в аппарате [22].

Ко второй группе относятся процессы дробления капель и пузырьков. Размеры капель и пузырьков малы по сравнению с размерами аппарата; поэтому конечные результаты перемешивания – диаметр образующихся капель и пузырьков или их удельная поверхность – мало зависят от макрохарактеристик потока. Он определяется главным образом интенсивностью микромасштабной турбулентности или величиной сдвиговых усилий в малых элементах объема, сопоставимых по размерам с частицами дисперсной фазы. К данной группе следует также отнести случаи, когда выравнивание концентраций реагирующих веществ на макроуровне недостаточно для нормального протекания химических реакций и существенную роль играет скорость подвода или отвода веществ на микроуровне, вплоть до расстояний, на которых проявляются силы межмолекулярного взаимодействия. Хотя скорость переноса в элементах объема столь малых масштабов (явление микросмешения) определяется в первую очередь физико-химическими свойствами среды и диффундирующих веществ, на нее оказывает влияние и микромасштабная структура потока.

Наряду с классификацией по масштабу процессы, происходящие в перемешивающих аппаратах, можно классифицировать и по наличию границы раздела фаз жидкость – твердая поверхность на:

1. Процессы, происходящие в объеме аппарата. В этом случае специфика происходящих процессов определяется особенностями течения жидкости, создаваемого в объеме аппарата.

2. Процессы, происходящие на границе раздела фаз жидкость – твердая поверхность. Эту группу образуют явления массообмена и теплообмена на границах раздела: «жидкость – корпус аппарата», «жидкость – поверхность перемешивающего устройства». Основное влияние на скорость процессов переноса при этом оказывают характеристики пограничного слоя, которые зависят от условий течения перемешиваемой среды в непосредственной близости к межфазовой поверхности.

Интенсивное перемешивание водовоздушной смеси позволяет осуществить перемещение газовой фазы (пузырька воздуха) относительно жидкой фазы (воды). В процессе этого перемещения происходят деформация пузырька воздуха и его дробление. Чем меньше величина поверхностного натяжения на границе пузырька воздуха, тем интенсивней протекают процессы его диспергирования.

На пузырек воздуха в процессе интенсивного перемешивания водовоздушной смеси действуют турбулентные пульсации скорости движения потока, в результате чего и происходит его относительное перемещение.

Турбулентные пульсации скорости потока имеют следующие основные характеристики:

- 1) масштаб турбулентных пульсаций скорости потока λ (м);
- 2) скорость турбулентных пульсаций потока u_λ (м/с);
- 3) градиент скорости турбулентных пульсаций потока G_λ (с⁻¹).

Дробление пузырьков воздуха смеси происходит только лишь под действием турбулентных пульсаций скорости потока, имеющих масштаб λ , не превышающий диаметр этих пузырьков d_n . Пульсации скорости потока больших размеров (масштабов) будут просто перемещать пузырек воздуха из одной точки потока в другую, не деформируя его.

Таким образом, масштабы турбулентных пульсаций скорости потока, приводящих к диспергированию пузырьков воздуха в перемешиваемой водовоздушной смеси, примерно должны быть равны размерам этих пузырьков. Поскольку в турбулентном потоке перемешиваемой воздушной смеси наблюдается широкий спектр масштабов пульсаций скоростей, то диспергирование пузырьков воздуха происходит вплоть до размеров, сопоставимых с размерами наиболее низкомасштабных пульсаций, обладающих достаточной энергией для нарушения сплошности раздела фаз «газ – жидкость». Наибольшей энергией и наименьшим масштабом λ_0 обладают турбулентные пульсации, при которых происходит диссипация их энергии (рассеивание энергии в окружающую среду).

λ_0 принято называть внутренним масштабом турбулентности, величина которой зависит от значения удельной секундной диссипации энергии ε_T , Вт/кг (энергия, затрачиваемая на перемешивание) и вязкости среды, характеризуемой величиной кинематического коэффициента вязкости ν (м²/с).

Величину удельной секундной диссипации энергии ε_T принято определять как отношение энергии, затрачиваемой на перемешивание смеси N (Вт), к ее массе M (кг)

$$\varepsilon_T = \frac{N}{M}, \left(\frac{\text{Вт}}{\text{кг}} \right); \left(\frac{\text{м}^2}{\text{с}^3} \right). \quad (2.82)$$

Величина мощности, затрачиваемой на перемешивание водовоздушной смеси N_p , может быть определена как отношение рассеиваемой в процессе

перемешивания энергии A_p (Дж) к продолжительности перемешивания Δt_p (с) (время, за которое произошло рассеивание энергии).

$$N_p = \frac{A_p}{\Delta t_p}, \text{ Вт}, \frac{\text{Дж}}{\text{с}}. \quad (2.83)$$

Поскольку внутренний масштаб турбулентности потока зависит от величины удельной секундной диссипации энергии и значения коэффициента кинематической вязкости среды потока ν , можно записать:

$$\lambda_0 = f(\varepsilon_T; \nu). \quad (2.84)$$

Поскольку λ_0 , ν , ε_T – величины, имеющие независимые размерности, то вместо уравнения можно записать

$$\lambda_0 = \nu^x \varepsilon_T^y; \quad (2.85)$$

размерности: $\lambda - \text{м}$; $\nu - \text{м}^2/\text{с}$; $\varepsilon_T - \text{м}^2/\text{с}^3$.

Тогда

$$\text{м} = \frac{\text{м}^{2x} \cdot \text{м}^{2y}}{\text{с}^x \cdot \text{с}^{3y}}.$$

Следовательно, имеем систему уравнений

$$\begin{cases} 1 = 2x + 2y; \\ 0 = x + 3y, \end{cases}$$

откуда

$$x = \frac{3}{4}; \quad y = -\frac{1}{4}.$$

В соответствии с найденными значениями x, y в формуле (2.86) внутренний масштаб турбулентности определяется по формуле

$$\lambda_0 = \sqrt[4]{\frac{\nu^3}{\varepsilon_T}}. \quad (2.87)$$

Аналогичным образом может быть найдена величина градиента скорости турбулентных пульсаций потока нулевого масштаба.

$$G_\lambda = \sqrt[4]{\frac{\varepsilon_T}{\nu}}, \text{ с}^{-1}. \quad (2.88)$$

Величину скорости турбулентных пульсаций нулевого масштаба можно определить из условия

$$G_\lambda = \frac{v_\lambda}{\lambda_0}, \quad (2.89)$$

откуда

$$V_\lambda = G_\lambda \lambda_0 = \frac{\frac{1}{1} \frac{3}{4}}{\frac{1}{2} \frac{4}{1}} \varepsilon_T^{\frac{1}{4}} \nu^{\frac{3}{4}} = \varepsilon_T^{\frac{1}{4}} \nu^{\frac{1}{4}} = \sqrt[4]{\varepsilon_T \nu}, \text{ м/с}. \quad (2.90)$$

Период турбулентных пульсаций нулевого масштаба вычислим из условия

$$T_\lambda = \frac{\lambda_0}{v_\lambda} = \frac{v^{\frac{3}{4}}}{\varepsilon_T^{\frac{1}{4}}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_T^{\frac{1}{4}} v^{\frac{1}{4}}} = \frac{v^{\frac{1}{2}}}{\varepsilon_T^{\frac{1}{2}}} = \sqrt{\frac{v}{\varepsilon_T}}, \text{ с.} \quad (2.91)$$

Таким образом, имеем замкнутую систему уравнений, характеризующих турбулентные пульсации потока нулевого масштаба:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_O = 4 \sqrt{\frac{v^3}{\varepsilon_T}}, \text{ м} \\ G_{\lambda O} = \sqrt{\frac{\varepsilon_T}{v}}, \text{ с} \\ U_{\lambda O} = \sqrt{\varepsilon_T} v, \text{ м/с} \\ T_{\lambda O} = \sqrt{\frac{v}{\varepsilon_T}}, \text{ с}^{-1} \end{array} \right. \quad (2.92)$$

При воздействии на пузырек воздуха диаметром d_n турбулентной пульсации потока, масштаб которой λ сопоставим с размерами пузырька ($\lambda \approx d_n$), он будет перемещаться относительно жидкости со скоростью v_n и испытывать действие силы гидродинамического давления $F_{гд}$

$$F_{гд} = \frac{\pi d_{II}^2}{4} \xi \frac{v_n^2}{2} \rho, \text{ Н,} \quad (2.92)$$

где ξ – электрокинетический потенциал, В.

В процессе перемещения на пузырек воздуха также будет действовать сила поверхностного натяжения $F_{пн}$

$$F_{пн} = \pi d_{II}^2 \Delta P_n = \pi d_{II}^2 \frac{4\sigma_n}{d_n} = 4\pi d_{II} \sigma_n, \text{ Н.} \quad (2.93)$$

Пузырек сохранит свою сферическую форму, если в процессе перемещения будет соблюдаться стационарный режим действия силы поверхностного натяжения, характеризуемый стационарностью условий относительно действия силы поверхностного натяжения, при этом

$$F_{пн} > F_{гд}, \text{ Н.} \quad (2.94)$$

В случае когда

$$F_{пн} \leq F_{гд}, \text{ Н,} \quad (2.95)$$

пузырек воздуха будет деформироваться, в результате чего величина силы поверхностного натяжения $F_{пн}$ возрастет и скомпенсирует действие силы

гидродинамического давления $F_{гд}$. При некотором критическом значении $V_{п}$ действие силы гидродинамического давления не может быть скомпенсировано увеличением силы поверхностного натяжения за счет деформации пузырька воздуха, в результате чего произойдет его дробление.

Условием начала процесса деформации поверхности пузырька воздуха под действием турбулентных пульсаций потока масштабом λ будет:

$$F_{пн} = F_{гд}, \text{ Н.} \quad (2.96)$$

Величина элементарной работы, совершаемой против действия силы поверхностного натяжения, может быть определена как

$$\Delta A_{пн} = F_{пн} \Delta l, \text{ Дж,} \quad (2.97)$$

где Δl – элементарное перемещение пузырька воздуха относительно жидкости (м).

При продолжительности перемещения пузырька воздуха Δt (с) со скоростью $V_{п}$ (м/с)

$$\Delta l = V_{п} \Delta t, \text{ м,} \quad (2.98)$$

тогда

$$\Delta A_{пн} = F_{пн} v_{п} \Delta l, \text{ Дж.} \quad (2.99)$$

Элементарная мощность при перемещении пузырька воздуха на расстояние Δl может быть определена как:

$$\Delta N_{пн} = \frac{\Delta A_{пн}}{\Delta T} = \frac{F_{пн} v_{п} \Delta l}{\Delta T} = \frac{4\pi d_{п} \sigma_{п} v_{п} \Delta T}{\Delta T} = 4\pi d_{п} \sigma_{п} v_{п}, \text{ Вт, } \frac{\text{Дж}}{\text{с}}. \quad (2.100)$$

Величина удельной секундной диссипации энергии при этом составит:

$$\varepsilon_{т} = \frac{\Delta N_{пн}}{\Delta m}, \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}. \quad (2.101)$$

Масса элементарного объема жидкости, перемешиваемой пузырьком воздуха диаметром $d_{п}$ при его элементарном перемещении Δl :

$$\Delta m = \frac{\pi d_{п}^2}{4} \Delta l \rho = \frac{\pi d_{п}^2}{4} v_{п} \Delta T \rho, \text{ кг,} \quad (2.102)$$

тогда

$$\varepsilon_{т} = 4\pi d_{п} \sigma_{п} v_{п} \cdot \frac{4}{\pi d_{п}^2 \rho v_{п} \Delta T} = 16 \frac{\sigma_{п}}{d_{п} \rho \Delta T}, \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}. \quad (2.103)$$

Величина элементарной энергии силы поверхностного натяжения может быть определена как

$$\Delta E_{пн} = \pi d_{п}^2 \sigma_{п}, \text{ Дж,} \quad (2.104)$$

тогда

$$\Delta T = \frac{E_{пн}}{\Delta N_{пн}} = \pi d_{п}^2 \sigma_{п} \cdot \frac{1}{4\pi d_{п} \sigma_{п} v_{п}} = \frac{1}{4} \frac{d_{п}}{v_{п}}, \text{ с.} \quad (2.105)$$

В работе [148] было предложено определять величину ΔT (время экспозиции) как:

$$\Delta T = \frac{d_{II}}{v_{II}}, \text{ с.} \quad (2.106)$$

Формула (2.106) была получена Р. Хигби на основе теории подобия без проведения термодинамического анализа. По нашему мнению, в данном случае было корректно использовать в качестве линейного размера пузырька воздуха не величину диаметра его поперечного сечения максимальной площади d_n (м), а величину его гидравлического радиуса R_n , представляющего собой отношение максимальной площади поперечного сечения ω_{II} (м²) к величине смоченного периметра этого сечения χ_{II} (м):

$$R_n = \frac{\omega_{II}}{\chi_{II}} = \frac{\pi d_{II}^2}{4} \cdot \frac{1}{\pi d_{II}} = \frac{d_{II}}{4}, \text{ м.} \quad (2.107)$$

Подставив формулу (2.105) в формулу (2.103), получим:

$$\varepsilon_T = 16 \frac{\sigma_{II}}{d_{II\rho}} \cdot \frac{4v_{II}}{d_{II}} = 64 \frac{\sigma_{II}}{d_{II}^2 \rho} v_{II}, \text{ Вт/кг,} \quad (2.108)$$

откуда

$$\varepsilon_T^2 = 4098 \frac{\sigma^2}{d_{II}^4 \rho^2} v_{II}^2, \text{ Вт}^2/\text{кг}^2. \quad (2.109)$$

Из (2.95) имеем

$$\frac{\pi d_{II}^2}{4} \rho \xi \frac{v_{II}^2}{2} = 4\pi d_{II} \sigma_{II}, \quad (2.110)$$

откуда

$$v_{II}^2 = \frac{32}{d_{II}} \cdot \frac{\sigma_{II}}{\rho \xi}, \text{ м}^2/\text{с}^2. \quad (2.111)$$

Подставляя формулу (2.110) в формулу (2.109), имеем

$$\varepsilon_T^2 = \frac{131072}{\xi} \cdot \frac{\sigma_{II}^3}{d_{II}^5 \rho^3}, \text{ Вт}^2/\text{кг}^2, \quad (2.112)$$

откуда

$$d_{II} = K_{\varepsilon\sigma} \left(\frac{\sigma_{II}^3}{\varepsilon^2 \rho^3} \right)^{1/5}, \text{ м,} \quad (2.113)$$

где $K_{\varepsilon\sigma} = \left(\frac{131072}{\xi} \right)^{1/5}$ – коэффициент, зависящий от гидродинамических условий, при которых осуществляется процесс диспергирования водовоздушной смеси.

В соответствии с рекомендациями [123] $K_{20} = 3 / 2$.

На рис.2.9 представлены графики зависимостей среднего диаметра пузырьков воздуха d_n в водовоздушной смеси, подвергнутой механическому диспергированию, от величины удельной секундной диссипации энергии ε_T при различных значениях коэффициента поверхностного натяжения неискривленной поверхности раздела фаз «жидкость – газ» $\sigma_{жг}$, полученные с использованием формулы (2.113).

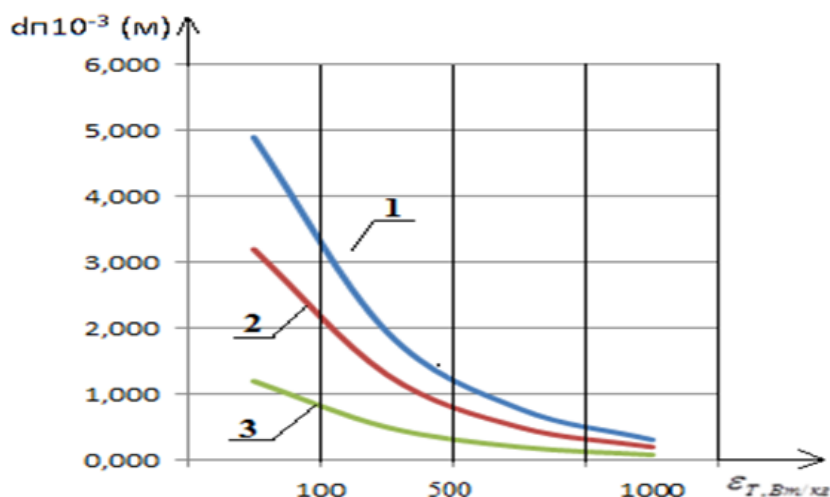


Рис.2.9. Графики зависимостей среднего диаметра пузырьков воздуха d_n в водовоздушной смеси, подвергнутой механическому диспергированию, от величины удельной секундной диссипации энергии ε_T при различных значениях коэффициента поверхностного натяжения неискривленной поверхности раздела фаз «жидкость – газ» $\sigma_{жг}$, полученные с использованием формулы (2.113):
 1 – $\sigma=0,073$ Дж/м²; 2 – $\sigma=0,035$ Дж/м²; 3 – $\sigma=0,007$ Дж/м²

Данные, представленные на рис. 2.9, свидетельствуют о том, что получить водовоздушную смесь со средним диаметром пузырьков воздуха d_n менее 100 мкм в процессе ее механического диспергирования можно лишь при величине удельной секундной диссипации энергии ε_T более 500 Вт/кг при добавлении поверхностно-активных веществ. Столь высокий уровень плотности диссипации энергии, необходимый для получения тонкодисперсной водовоздушной смеси, может быть достигнут за счет использования кавитационной обработки.

Кавитационная обработка является технологическим приемом, позволяющим реализовать эффект концентрации среднего уровня механической энергии низкой плотности в локальный уровень высокой плотности энергии, связанный с пульсациями и захлопыванием кавитационных каверн. В связи с этим была разработана оригинальная конструкция роторно-кавитационного устройства, позволяющего диспергировать до требуемого уровня водовоздушную смесь, образуемую на выходе с водовоздушного эжектора.

Выводы

1. Эффективная флотационная очистка сточных вод, содержащих нефтепродукты, возможна только при использовании мелкодисперсных водовоздушных смесей со средним диаметром пузырьков воздуха 100 мкм.

2. Повышение давления в сатураторе при использовании метода напорной флотации, позволяющего получить водовоздушную смесь с пузырьками требуемого размера, более некоторой оптимальной величины не приводит к увеличению эффекта очистки сточных вод от нефтепродуктов.

3. Традиционные методы диспергирования позволяют получить водовоздушную смесь со средним диаметром пузырьков воздуха менее 100 мкм лишь при величине диссипации энергии $\epsilon_t > 500$ Вт/кг, при условии добавления в жидкость ПАВ.

4. Получить мелкодисперсную смесь с высоким газонаполнением можно в процессе обработки водовоздушной смеси в роторно-кавитационном устройстве в результате реализации технологического приема концентрации среднего уровня механической энергии перемешивания в уровень высокой удельной плотности энергии локальной области, наблюдаемой при захлопывании кавитационных каверн.

3. ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ВОДОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В РОТОРНО-КАВИТАЦИОННОМ УСТРОЙСТВЕ

3.1. Объект исследований, программа и методика проведения исследований процесса диспергирования водовоздушной смеси в роторно-кавитационном устройстве

3.1.1. Объект и предмет исследований

Объектом исследований в данном цикле являются сточные воды, образующиеся в процессе промывки поверхности изделий, выпускаемых предприятием машиностроительного профиля. В технологических процессах предприятия используются непроточные промывочные ванны.

Для приготовления промывочных растворов применяются реагенты:

1) сода кальцинированная (ГОСТ 5100–85) – средняя концентрация в растворе 30-40 г/л;

2) едкий натр (ГОСТ 2263–79) – средняя концентрация в растворе 10-15 г/л;

3) тринатрий фосфат (ГОСТ 201–76) – средняя концентрация в растворе 50-70 г/л;

4) препарат ОП-7 (ГОСТ 8433–81) – средняя концентрация в растворе 3-5 г/л.

Отработанные промывные растворы сбрасываются в канализационную сеть предприятия.

Средняя концентрация загрязняющих веществ в сточных водах от промывочных ванн и требования к качеству промывочных растворов представлена в форме табл. 3.1.

Т а б л и ц а 3 . 1

Средняя концентрация загрязняющих веществ в сточных водах от промывочных ванн и требования к качеству промывочных растворов

Наименование загрязняющего вещества	Концентрация загрязняющего вещества в сточных водах, мг/л	Требования, предъявляемые к промывочным растворам, мг/л
Взвешенные вещества	340-2000	20
Нефтепродукты	340-500	4,5
Железо	1,5-4,0	0,3

Данные, приведенные в табл. 3.1, показывают, что в сточных водах от промывочных ванн наблюдается превышение по показателям: взвешенные вещества – в 10-100 раз; нефтепродукты – в 75,6-111,1 раза; железа в 5-13,3 раза.

Промывные сточные воды после процесса очистки и добавления в них необходимых реагентов могут быть повторно использованы в качестве промывочных растворов.

Основными загрязнителями промывных сточных вод являются нефтепродукты (превышение ПДК в 111 раз).

Предметом исследования являлась технология диспергирования водовоздушной смеси, образующейся при пропускании сточных вод предприятия машиностроительного профиля через эжектор, в процессе ее обработки в роторно-кавитационном устройстве.

Цель проведения данного этапа исследований – определение оптимальных параметров процесса диспергирования водовоздушной смеси, образующейся в результате пропускания сточных вод предприятия машиностроительного профиля через эжектор, при ее обработке в роторно-кавитационном устройстве.

3.1.2. Описание установки для проведения лабораторных исследований процесса диспергирования водовоздушной смеси в роторно-кавитационном устройстве

Исследования процесса диспергирования водовоздушной смеси проводились на установке, схема которой представлена на рис. 3.1.

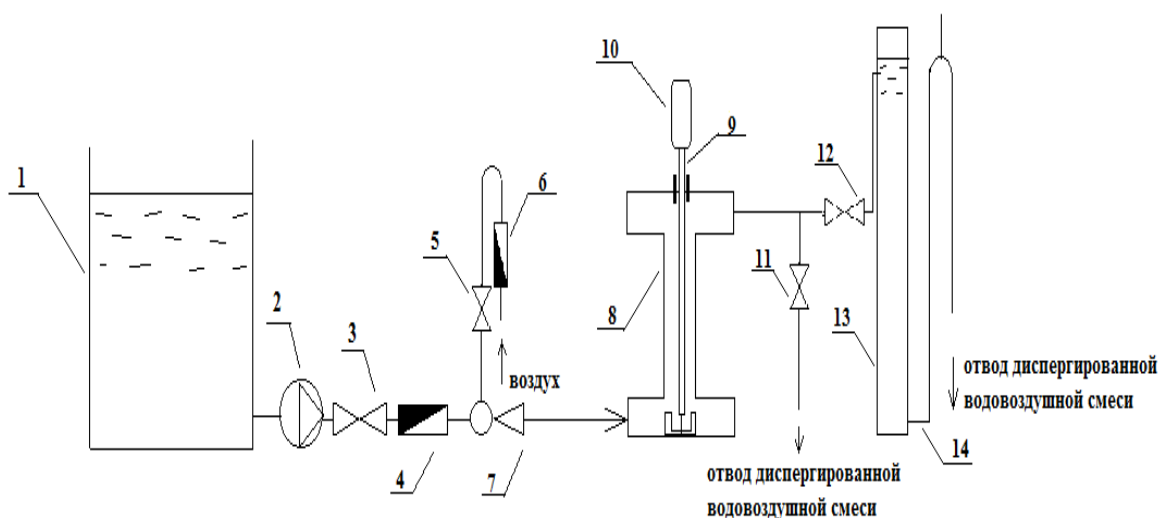
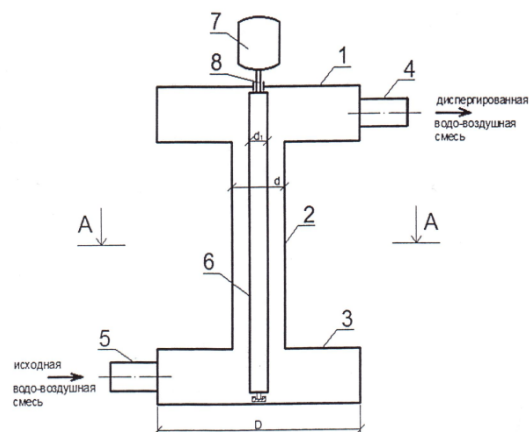


Рис. 3.1. Схема лабораторной установки для исследования процесса диспергирования водовоздушной смеси:

- 1 – бак для промывочных сточных вод машиностроительного предприятия;
- 2 – насос; 3, 5, 11, 12 – запорная арматура; 4 – расходомер перекачиваемых сточных вод; 6 – поплавковый ротаметр для контроля расхода подсосываемого воздуха; 7 – водовоздушный эжектор; 8 – роторно-кавитационное устройство;
- 9 – ротор; 10 – электродвигатель; 13 – стеклянная колонна; 14 – патрубок для отвода диспергированной водовоздушной смеси

На рис. 3.2 изображена конструктивная схема роторно-кавитационного устройства.

На рис. 3.3 приведен общий вид роторно-кавитационного устройства.



Фиг. 1

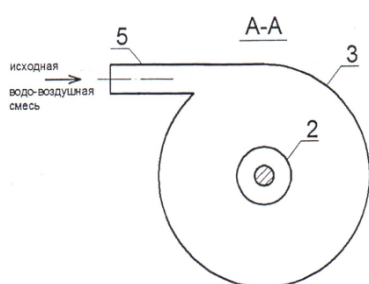


Рис. 3.2. Конструктивная схема роторно-кавитационного устройства: 1 – камера выхода диспергированной водовоздушной смеси; 2 – вихревая камера; 3 – камера входа водовоздушной смеси; 4 – патрубок отвода диспергированной водовоздушной смеси; 5 – патрубок подачи исходной водовоздушной смеси; 6 – ротор; 7 – электродвигатель; 8 – вал



Рис. 3.3. Общий вид роторно-кавитационного устройства

У камеры входа водовоздушной смеси 3 и камеры выхода диспергированной водовоздушной смеси 1 одинаковый диаметр D . Вихревая камера 2 имеет диаметр $d=0,2D$. Поверхность ротора 6 покрыта силикатной эмалью. Диаметр ротора $d_p=0,2d$.

Устройство работает следующим образом. Крупнодисперсная водовоздушная смесь, образующаяся на выходе с эжектора, под остаточным давлением поступает в патрубок 5, тангенциально присоединенный к камере входа 3. За счет тангенциальной подачи водовоздушной смеси в камере входа 3 создается вращательное движение потока. При выходе потока из камеры 3 в соосно присоединенную к ней вихревую камеру 2 угловая скорость вращения смеси ω в соответствии с принципом сохранения момента количества движения увеличивается пропорционально квадрату отношения D/d . В результате вращательно-поступательного движения водовоздушной смеси в вихревой камере 2 создается поле действия центробежных сил, под

воздействием которого пузырьки воздуха переносятся к оси камеры. В приосевой области вихревой камеры создается пониженное давление. По оси вихревой камеры размещается ротор, приводимый во вращение электродвигателем 7 посредством вала 8. На поверхности вращающегося ротора 6, покрытой силикатной эмалью, в результате прилипания к ней пузырьков воздуха образуются искусственные газовые каверны. Создание пульсирующих искусственных газовых каверн за счет подачи в область разрежения около тела обтекания (ротора 6) воздуха обеспечивает возникновение режима кавитации, при котором образуются кавитационные пузырьки, состоящие из паров воды. Эти пузырьки растут до критических размеров, после чего схлопываются. Возникающие в момент схлопывания кавитационных пузырьков кумулятивные струйки обеспечивают диспергирование пузырьков воздуха водовоздушной смеси. Прошедшая кавитационно-кумулятивную обработку в вихревой камере 2 диспергированная водовоздушная смесь поступает в камеру выхода 1 и отводится из устройства через патрубок 4.

В роторно-кавитационном устройстве 8 (см. рис. 3.1) предусмотрена возможность замены ротора 9, покрытого силикатной эмалью, на ротор с необработанной поверхностью.

Общий вид ротора, покрытого стеклоэмалью, и ротора с необработанной поверхностью представлен на рис. 3.4.



Рис. 3.4. Общий вид ротора покрытого стеклоэмалью и ротора с необработанной поверхностью

Эмалевое покрытие представляет собой нанесенное на стальной стержень легкоплавкое стекло, полученное оплавлением шликера сырьевых материалов, главным образом оксидов кремния, натрия, калия, кальция, алюминия, бора и др. Силикатная эмаль марки МК-5 была приготовлена на ОАО «Пензаводпром» путем ее плавления в специальной электропечи.

Технология нанесения стеклоэмалевого покрытия, кроме подготовки сырьевого материала и приготовления эмалевого шликера, включала подготовку поверхности ротора, нанесение эмалевого шликера, его сушку, термообработку покрытия и контроль его качества [17].

Проведенные исследования [49] показали, что уникальные гидравлические характеристики, которыми обладает силикатная эмаль марки МК-5, позволяют понизить величину коэффициента гидравлического сопротивления λ по длине стальной трубы (изготовлена по ГОСТ 87 31–74), покрытой этой эмалью, в 1,57 раза. Особые свойства поверхности ротора, покрытого

стеклоэмалью, обуславливают прилипание к ней пузырьков воздуха, находящихся в диспергируемой водовоздушной смеси.

На поверхности ротора в результате прилипания к ней пузырьков воздуха образуются искусственные каверны. Способ создания искусственных каверн за счет подачи в область разрежения около тела обтекания воздуха или иного газа независимо друг от друга был впервые предложен в 1944 г. и в 1945 г. Рейхардом и Эйнштейном [99].

Искусственные и естественные каверны идентичны при одинаковых числах кавитации σ_k , определяемых по формуле

$$\sigma_k = \frac{P_0 - P_1}{\rho \frac{v_0^2}{2}}, \quad (3.1)$$

где P_0 и P_1 – давления соответственно в потоке и внутри каверны, Па; v_0 – скорость потока, м/с; ρ – плотность потока, кг/м³.

Эффект кавитации возникает при равенстве давления внутри каверны P_1 и давления насыщенного пара P_v . За счет создания искусственных каверн эффект кавитации можно получить при скоростях потока в несколько метров в секунду, тогда как в естественных условиях режим кавитации наблюдается при скоростях потока порядка нескольких десятков метров в секунду. Тонкое диспергирование водовоздушной смеси в процессе ее обработки в роторно-кавитационном устройстве происходит под воздействием кумулятивных микроструек, возникающих при схлопывании пузырьков, отрывающихся от суперкаверн, образующихся на роторе [17].

3.1.3. Программа и методика проведения лабораторных исследований технологии диспергирования водовоздушной смеси в роторно-кавитационном устройстве

Программа данного этапа лабораторных исследований предусматривала изучение процесса диспергирования водовоздушной смеси, полученной при пропускании промывных сточных вод машиностроительного предприятия через эжектор, в роторно-кавитационном устройстве.

В ходе проведения данного этапа исследований решались следующие задачи [13, 18, 19, 20, 21]:

1. Определение целесообразности использования роторно-кавитационного устройства для получения мелкодисперсной водовоздушной смеси с высоким газонаполнением.

2. Выявление зависимости эффективности процесса обработки водовоздушной смеси в роторно-кавитационном устройстве от материала поверхности ротора.

3. Установление влияния величины окружной скорости вращения ротора роторно-кавитационного устройства на процесс диспергирования водовоздушной смеси.

4. Установление зависимости эффективности процесса диспергирования водовоздушной смеси в роторно-кавитационном устройстве от величины газонаполнения подаваемой в него водовоздушной смеси.

5. Определение влияния скорости водовоздушной смеси в патрубке камеры входа роторно-кавитационного устройства на процесс диспергирования водовоздушной смеси.

В ходе проведения исследований процесса диспергирования водовоздушной смеси реальные промывные сточные воды машиностроительного предприятия обрабатывались на опытной установке, схема которой представлена на рис. 3.1.

Промывные сточные воды из бака 1 подавались центробежным насосом 2 в водовоздушный эжектор 7. Расход сточных вод регулировался запорной арматурой 3 и измерялся расходомером 4. Расход подсасываемого водовоздушным эжектором 7 воздуха контролировался поплавковым ротометром 6 и регулировался вентилем 5.

Расход водовоздушной смеси, подаваемой в стеклянную колонну 13, регулировался вентилями 11 и 12.

Величина удельного газонаполнения φ водовоздушной смеси, подаваемой в роторно-кавитационное устройство (8), определялась по формуле

$$\varphi = \frac{Q_v}{Q_c + Q_v}, \quad (3.2)$$

где Q_v – расход воздуха, подсасываемого воздушным патрубком эжектора (7), м³/ч; Q_c – расход промывных сточных вод, перекачиваемых насосом (2), м³/ч.

Величина удельного газонаполнения водовоздушной смеси, подаваемой в роторно-кавитационное устройство, регулировалась вентилем 5 и изменялась в пределах $\varphi = 0,1 - 0,7$.

Частота вращения ротора (9), имеющего диаметр $d_p = 14 \cdot 10^{-3}$ м, изменялась в пределах $n_p = 1,7 - 100 \text{ с}^{-1}$ регулятором на электродвигателе (10). Окружная скорость поверхности ротора при этом составляла $v_{ok} = 0,08 - 4,4$ м/с.

Вентилями 11 и 12 устанавливался расход подаваемой в стеклянную колонну 13 водовоздушной смеси, обеспечивающий величину скорости нисходящего потока на уровне 0,14 м/с, что позволяло отделить из водовоздушной смеси пузырьки воздуха, имеющие диаметр более $d_{II} = 500$ мкм.

Величину среднего диаметра пузырьков воздуха d_{IIc} в водовоздушной смеси в колонне 13 определяли путем резкого закрытия вентиля 12.

В результате прекращения подачи водовоздушной смеси в колонну 13 в ней в процессе всплывания пузырьков воздуха образовывалась граница раздела «водовоздушная смесь – вода». По скорости движения границы раздела $v_{ПС}$ с учетом формулы Стокса определялся средний диаметр пузырьков воздуха в водовоздушной смеси $d_{ПС}$, м:

$$d_{ПС} = \sqrt{\frac{18v_{ПС}v_{см}}{g} \frac{\rho}{\rho - \rho_в}}. \quad (3.3)$$

Величину газонаполнения водовоздушной смеси в колонне 13 определяли по формуле

$$\varphi_k = \frac{H_{см} - H_{ж}}{H_{см}}, \quad (3.4)$$

где $H_{см}$ – высота слоя водовоздушной смеси в колонне 13 после закрытия вентиля 12, м; $H_{ж}$ – высота слоя жидкости после отделения из водовоздушной смеси пузырьков воздуха, м.

Величину коэффициента кинематической вязкости водовоздушной смеси $v_{см}$, м²/с, вычисляли в соответствии с рекомендациями, приведенными в [103], по формуле

$$v_{см} = v \frac{1 + \frac{9}{2}\varphi}{1 - \varphi}, \quad (3.5)$$

где $v = 1,01 \cdot 10^{-6}$ м²/с – коэффициент кинематической вязкости воды.

3.2. Теоретические основы процесса обработки водовоздушной смеси в роторно-кавитационном устройстве

Процесс кавитации в жидкости рассматривается как образование заполненных паром и газом полостей при локальном понижении давления в жидкости до давления насыщенных паров [96]. Внутри образовавшихся полостей (каверн) может наблюдаться различное соотношение содержания газа и пара (от нуля до единицы).

В зависимости от концентрации содержащегося в образовавшихся полостях пара или газа их называют паровыми или газовыми [96].

Различают гидродинамическую кавитацию, возникающую за счет местного понижения давления в потоке жидкости при обтекании твердого тела, и акустическую кавитацию, возникающую при прохождении через жидкость акустических колебаний.

Чтобы в жидкости образовалась каверна, заполненная паром и газом, необходимо раздвинуть соседние молекулы жидкости на расстояние не менее удвоенной длины промежутка между ними. Максимальное растягивающее давление P_p , Па, которое может выдерживать жидкость, определяется по формуле

$$P_p = \frac{2\sigma_{жг}}{R_k}, \text{ Па} \quad (3.6)$$

где $\sigma_{жг}$ – коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела фаз «жидкость – газ», Дж/м²; R_k – радиус образовавшейся каверны (пузырька), м.

Для чистой дегазированной воды при отсутствии ядер кавитации величина P_p , рассчитанная по формуле (3.6), составляет порядка 1000 мПа.

Кавитационная прочность воды в реальных условиях, как правило, не превышает нескольких десятков мПа.

В [99] приводятся сведения о том, что вода, подвергнутая предварительной тщательной фильтрации, разрывалась при отрицательном давлении в 30 МПа.

Расхождение между теоретическим и экспериментальными значениями величин кавитационной прочности воды объясняется наличием в воде в реальных условиях различных включений и примесей, которые выступают в роли зародышей (центров) кавитации и значительно понижают ее прочность.

Теоретически вода начинает кипеть, когда давление в некоторых локальных участках ее объема снижается до давления насыщенного пара. В реальных условиях величина давления, при котором начинается кавитация, существенно зависит от состава воды. Если в воде содержится значительное количество растворенного газа, то понижение давления приводит к выделению этого газа из раствора и образованию газовых полостей (каверн), внутри которых давление выше, чем давление насыщенного пара воды. В этом случае в воде образуется множество микроскопических, невидимых глазом пузырьков, которые формируют ядра кавитации [14]. Кавитационные пузырьки формируются в процессе роста этих ядер, в результате чего процесс кавитации может протекать при большем давлении, чем давление насыщенных паров.

В воде, вследствие броуновского движения, наблюдаются флуктуации ее внутренней структуры, в результате чего образуются области пространства с молекулами высокой и низкой энергии. Возникновение ядер кавитации происходит в области пространства с молекулами, обладающими высокой энергией, такие области называются областями повышенной микротемпературы.

При возникновении ядра кавитации, имеющего радиус меньше некоторой критической величины $R_{к.кр}$, силы поверхностного натяжения приведут к его схлопыванию. Для объяснения наличия в воде устойчивых микроядер кавитации был выдвинут ряд гипотез [30, 34, 35]. Одна из них базируется на

предположении о том, что микропузырьки образуются в мельчайших трещинах на поверхностях, ограничивающих жидкость. Данное предположение до некоторой степени подтверждается тем фактом, что кавитация обычно начинается на таких поверхностях. Однако кавитация может происходить и в объеме жидкости вдали от поверхности кавитирующего устройства, например в центре турбулентного вихря или в ультразвуковом поле.

В работе [144] выдвинуто предположение о том, что в объеме жидкости ядра кавитации возникают в микротрещинах на поверхности дисперсных частиц, присутствующих в жидкости в виде загрязняющих примесей.

Образование ядер кавитации в работе [105] объясняется прохождением через жидкость элементарных частиц высоких энергий, присутствующих в космических лучах.

В большинстве теоретических работ по кавитации рассматривается поведение единичной кавитационной каверны (пузырька). В реальных условиях, как правило, образуется кавитационный кластер, занимающий определенную часть пространства и состоящий из множества кавитационных каверн. Форма и длина кавитационного кластера определяется начальным спектром размеров кавитационных ядер, характером прикладываемого напряжения и граничными условиями.

По виду возникающего кавитационного кластера принято различать четыре типа кавитации: пузырьковую, пленочную, развитую и вихревую.

В процессе пузырьковой кавитации каверны располагаются группами, отделенными друг от друга. В процессе развития пузырьковая кавитация переходит в пленочную, при которой наблюдаются кавитационные каверны, существующие в виде тонких длинных полос, как правило, располагаемых параллельными группами.

Развитая кавитация характеризуется одной пульсирующей суперкаверной, образующейся за кромкой тела обтекания. Развитую кавитацию принято называть суперкавитацией.

Кавитацию, возникающую в ядрах вихрей, принято называть вихревой кавитацией.

Полный термодинамический цикл процесса кавитации состоит из двух фаз: фазы образования и расширения кавитационной каверны, наблюдаемой в зоне пониженного давления, и фазы схлопывания этой каверны, происходящей при повышении давления.

Уменьшение геометрических размеров кавитационной каверны в фазе повышения давления происходит в результате конденсации (фазового перехода) содержащихся в ней паров жидкости. Из-за потери сферичности кавитационной каверны в процессе уменьшения ее геометрических размеров образуется «вмятина», что сопровождается возникновением кумулятивной струйки.

На рис. 3.5 приведена кинетика процесса схлопывания кавитационной каверны диаметром $d_k = 3$ мм через 4, 5, 6, 7 мкс после начала процесса схлопывания по данным [132].

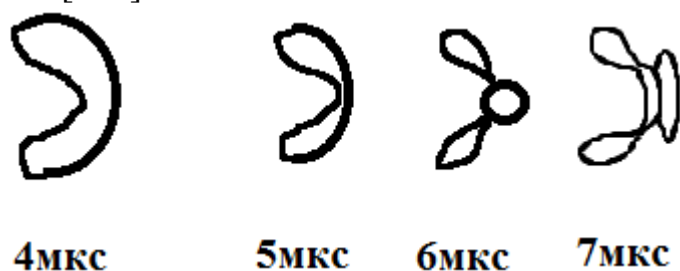


Рис. 3.5. Кинетика процесса схлопывания сферической кавитационной каверны диаметром $d_k = 3$ мм через 4, 5, 6, 7 мкс после начала процесса схлопывания по данным [132]

Величина скорости движения границы раздела фаз «вода – пар (воздух)» в рассматриваемом случае определяет величину скорости образующейся кумулятивной струйки:

$$v_k = \frac{d_k}{\Delta T} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{7 \cdot 10^{-6}} = 429 \text{ м/с.}$$

В соответствии с формулой Н.Е. Жуковского величина ударного давления кумулятивной струйки ΔP_k , Па, будет зависеть от ее скорости v_k .

$$\Delta P_k = \rho_k v_k C, \quad (3.7)$$

где ρ – плотность воды, кг/м³; C – скорость распространения ударной волны в воде, $C=1400$ м/с.

$$\Delta P_k = 998,2 \cdot 429 \cdot 1400 = 590 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

В [99] приводятся данные о том, что величина возникающего в жидкости под действием кумулятивной струйки перепада давлений может достигать 400 мПа, а температура окружающей кавитационную каверну жидкости повышается до 800 °С.

Образующаяся после схлопывания кавитационной полости сферическая ударная волна быстро затухает в пространстве.

Явления, инициируемые в жидкости процессом кавитации, принято подразделять на: люминесценцию (свечение жидкости); химические эффекты (механохимические реакции); диспергирование (измельчение эмульсий и суспензий); эмульгирование (смешивание и гомогенизация несмешивающихся жидкостей) и эрозию твердого тела (разрушение поверхности) [30].

В момент схлопывания кавитационной каверны наблюдается слабое свечение (люминесценция). Было выдвинуто предположение, что процесс люминесценции обуславливается рекомбинацией свободных ионов, появившихся в результате тепловой или механической диссоциации молекул на поверхности каверны [61].

В работе [99] приводятся данные, свидетельствующие о том, что причиной свечения является нагревание газа внутри кавитационной каверны, обусловленное высоким давлением и температурой в момент ее схлопывания. Как правило, длительность световой вспышки составляет $2 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^{-3}$ с. Интенсивность свечения зависит от количества газа в кавитационной каверне. Если кавитационная каверна полностью состоит из пара и газ в ней отсутствует, свечение не возникает. В кавитационную каверну проникают пары воды, растворенные в воде газы, а также вещества с высокой упругостью пара. Выделяющаяся в процессе схлопывания кавитационной каверны энергия обуславливает возбуждение, ионизацию и диссоциацию содержащихся внутри нее паров и газов.

Во-первых, содержащиеся в каверне газы – окислители и восстановители (O_2 и H_2) – участвуют в реакциях трансформации радикалов:



Во-вторых, химически активные газы, проникая в кавитационную полость, участвуют в передаче энергии электронного возбуждения молекулам воды, а также в процессе перезарядки.

При схлопывании кавитационной каверны в раствор переходят радикалы H^{\bullet} ; OH^{\bullet} , ионы и электроны, образовавшиеся в газовой фазе при расщеплении молекулы H_2O и веществ с высокой упругостью пара, продукты их взаимодействия и частичных рекомбинаций, а также метастабильные возбужденные молекулы H_2O .

Суммарную схему кавитационного расщепления молекул воды можно представить в виде:



Возникающие в системе активные частицы после перехода в раствор сольватируются и реагируют с растворенными веществами.

В результате кавитационной обработки наблюдается изменение физико-химических свойств воды: увеличение уровня рН, повышение электропроводности; увеличение числа свободных ионов и активных радикалов; структуризация и активация молекул.

Явления диспергирования, эмульгирования и эрозии поверхности твердого тела обуславливаются в основном двумя характерными проявлениями кавитации: ударными волнами и кумулятивными струйками, образующимися при схлопывании кавитационных пузырьков [14]. Кумулятивные струйки разрушают поверхность дисперсной частицы за счет кинетической энергии жидкости. Мелкие дисперсные частицы, размеры которых соизмеримы с поперечным сечением кумулятивных струй, увлекаются ими и вносят дополнительный вклад в процесс диспергирования эмульсий и суспензий, находящихся в жидкости.

3.3. Результаты экспериментальных исследований технологии диспергирования водовоздушной смеси в роторно-кавитационном устройстве

Результаты экспериментальных исследований зависимости величины средней коллективной скорости всплывания пузырьков воздуха $v_{пс}$, м/с, в водовоздушной смеси, прошедшей обработку в роторно-кавитационном устройстве, от величины окружной скорости движения ротора $v_{ок}$, м/с, и материала поверхности ротора при газонаполнении исходной водовоздушной смеси $\varphi = 0,5$ и скорости водовоздушной смеси в патрубке камеры входа $v_{кв} = 3$ м/с представлены в виде графиков на рис. 3.6.

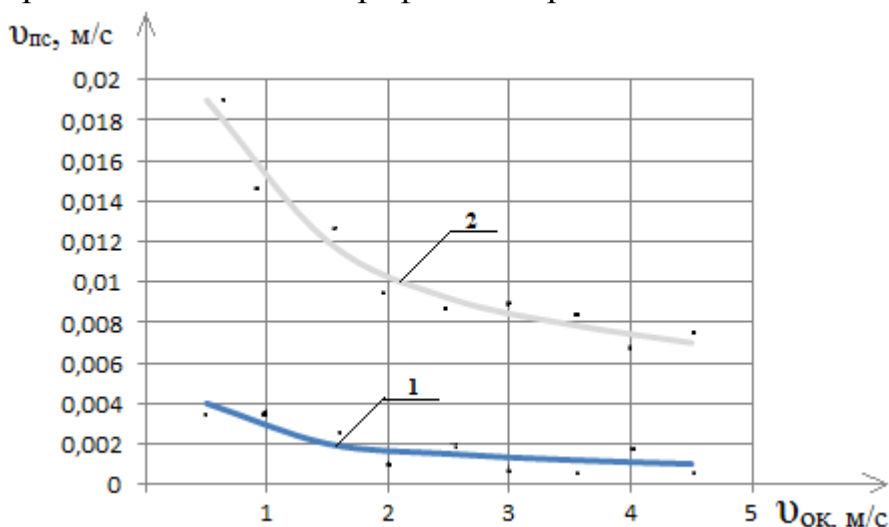


Рис. 3.6. Зависимости величины средней коллективной скорости всплывания пузырьков воздуха $v_{пс}$, м/с, в водовоздушной смеси, прошедшей обработку в роторно-кавитационном устройстве, от величины окружной скорости движения ротора $v_{ок}$, м/с, и материала поверхности ротора при газонаполнении исходной водовоздушной смеси $\varphi = 0,5$ и скорости водовоздушной смеси в патрубке камеры входа $v_{кв} = 3$ м/с:
1 – поверхность ротора, покрытая стеклоэмалью марки МК-5;
2 – необработанная поверхность ротора

Результаты экспериментальных исследований зависимости величины газонаполнения водовоздушной смеси, прошедшей обработку в роторно-кавитационном устройстве, φ от величины окружной скорости движения ротора $v_{ок}$, м/с, и материала поверхности ротора при газонаполнении исходной водовоздушной смеси $\varphi = 0,5$ и скорости водовоздушной смеси в патрубке камеры входа $v_{кв} = 3$ м/с представлены в виде графиков, изображенных на рис. 3.7.

Зависимости величины коэффициентов кинематической вязкости смеси, прошедшей обработку в роторно-кавитационном устройстве, $v_{см}$, м²/с, от величины окружной скорости движения ротора $v_{ок}$, м/с, и материала поверхности ротора при газонаполнении исходной водовоздушной смеси $\varphi = 0,5$ и

скорости водовоздушной смеси в патрубке камеры входа $v_{кв}=3$ м/с представлены в виде графиков, изображенных на рис. 3.8.

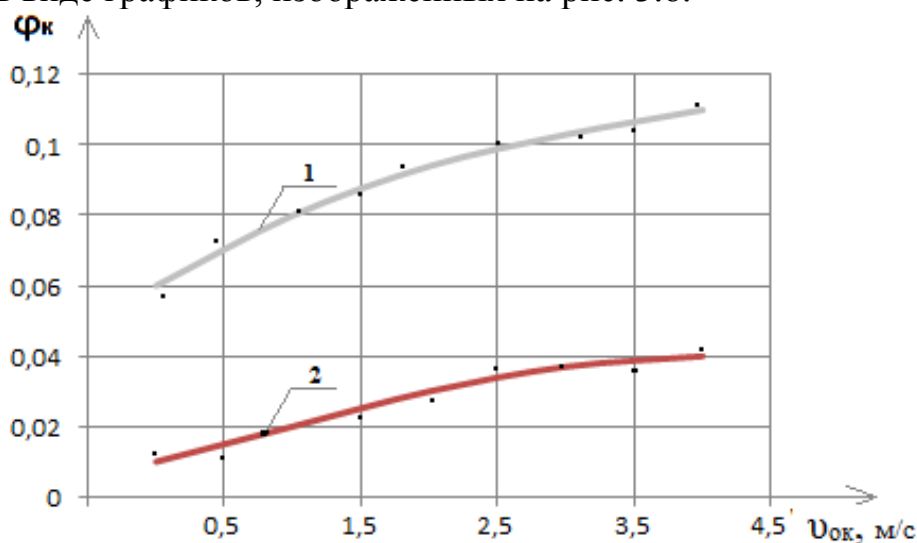


Рис.3.7. Зависимости величины газонаполнения водовоздушной смеси ϕ , прошедшей обработку в роторно-кавитационном устройстве, от величины окружной скорости движения ротора $v_{ок}$, м/с, и материала поверхности ротора при газонаполнении исходной водовоздушной смеси $\phi=0,5$ и скорости водовоздушной смеси в патрубке камеры входа $v_{кв}=3$ м/с:

- 1 – поверхность ротора, покрытая стеклоэмалью марки МК-5;
- 2 – необработанная поверхность ротора

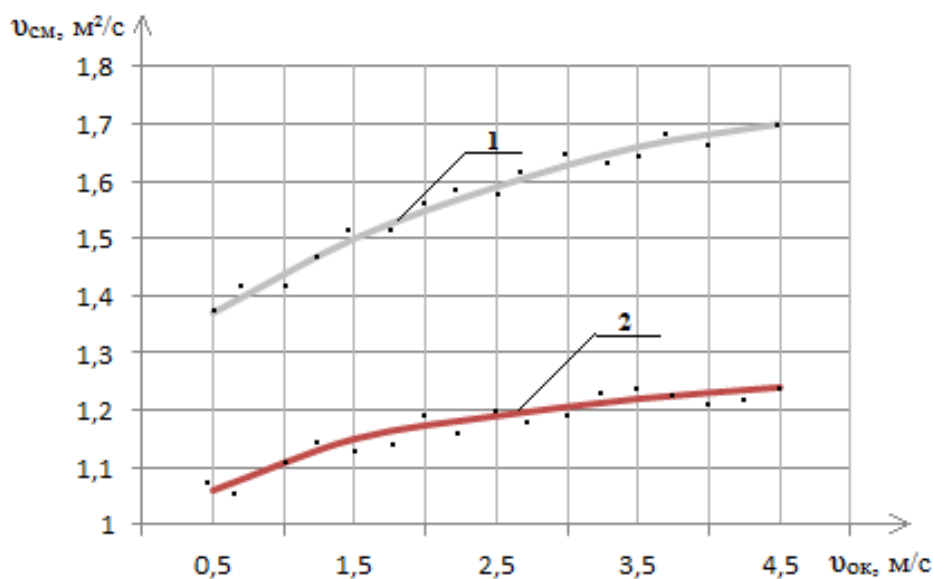


Рис.3.8. Зависимости величины коэффициентов кинематической вязкости смеси, прошедшей обработку в роторно-кавитационном устройстве $v_{см}$, $\text{м}^2/\text{с}$, от величины окружной скорости движения ротора $v_{ок}$, м/с, и материала поверхности ротора при газонаполнении исходной водовоздушной смеси $\phi=0,5$ и скорости водовоздушной смеси в патрубке камеры входа $v_{кв}=3$ м/с:

- 1 – поверхность ротора, покрытая стеклоэмалью марки МК-5;
- 2 – необработанная поверхность ротора

Зависимости величины среднего диаметра пузырьков воздуха в водовоздушной смеси, прошедшей обработку в роторно-кавитационном устройстве, d_{nc} , м, от величины окружной скорости движения ротора $v_{ок}$, м/с, и материала поверхности ротора при газонаполнении исходной водовоздушной смеси $\varphi=0,5$ и скорости водовоздушной смеси в патрубке камеры входа $v_{кв}=3$ м/с представлены в виде графиков, изображенных на рис. 3.9.

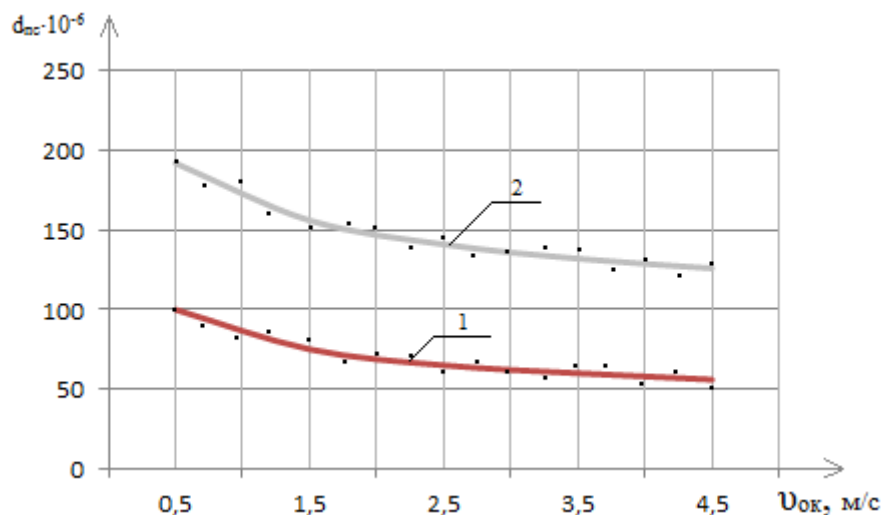


Рис.3.9. Зависимости величины среднего диаметра пузырьков воздуха в водовоздушной смеси, прошедшей обработку в роторно-кавитационном устройстве $d_{nc} \cdot 10^{-6}$ (м), от величины окружной скорости движения ротора $v_{ок}$ (м/с) и материала поверхности ротора при газонаполнении исходной водовоздушной смеси $\varphi = 0,5$ и скорости водовоздушной смеси в патрубке камеры входа $v_{кв} = 3,0$ м/с:
 1 – поверхность ротора покрытая силикатной эмалью марки МК-5;
 2 – необработанная поверхность ротора

Результаты экспериментальных исследований зависимости величины среднего диаметра пузырьков воздуха в водовоздушной смеси, прошедшей обработку в роторно-кавитационном устройстве, $d_{nc} \cdot 10^{-6}$ (м) от величины газонаполнения исходной водовоздушной смеси φ и материала поверхности ротора при скорости движения ротора $v_{ок}=3,0$ м/с и скорости водовоздушной смеси в патрубке камеры входа $v_{кв}=3$ м/с представлены в виде графиков, изображенных на рис. 3.10.

Результаты экспериментальных исследований зависимости величины среднего диаметра пузырьков воздуха в водовоздушной смеси, прошедшей обработку в роторно-кавитационном устройстве, $d_{nc} \cdot 10^{-6}$ (м) от величины скорости водовоздушной смеси в патрубке входа $v_{кв}$ (м/с), и материала поверхности ротора при газонаполнении исходной водовоздушной смеси $\varphi=0,5$ и скорости движения ротора $v_{ок}=3,0$ м/с представлены в виде графиков, изображенных на рис. 3.11.

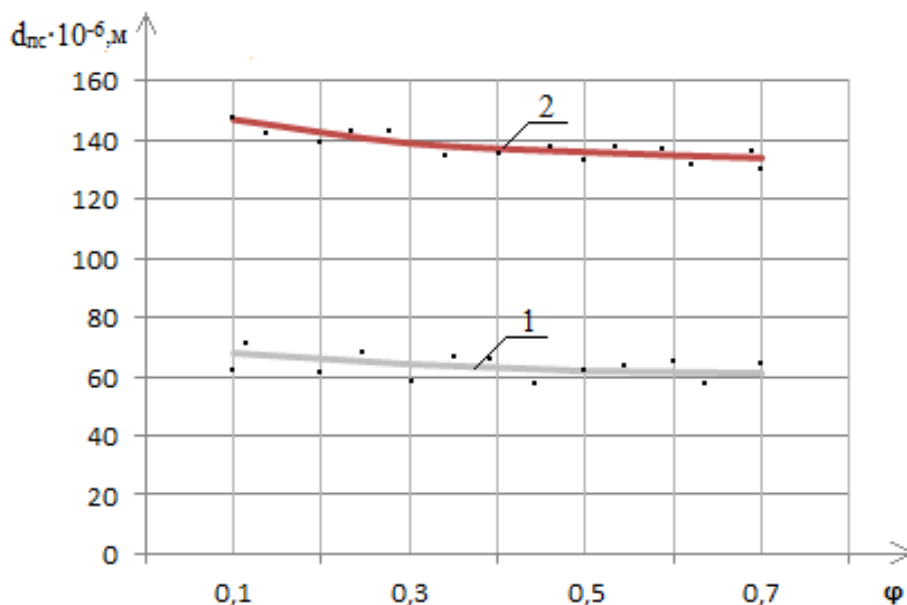


Рис. 3.10. Зависимости величины среднего диаметра пузырьков воздуха в водовоздушной смеси прошедшей обработку в роторно-кавитационном устройстве, $d_{nc} \cdot 10^{-6}$ (м) от величины газонаполнения исходной водовоздушной смеси φ и материала поверхности ротора при скорости движения ротора $v_{ок} = 3,0$ м/с и скорости водовоздушной смеси в патрубке камеры входа $v_{кв} = 3,0$ м/с:
 1 – поверхность ротора, покрытая силикатной эмалью марки МК-5;
 2 – необработанная поверхность ротора

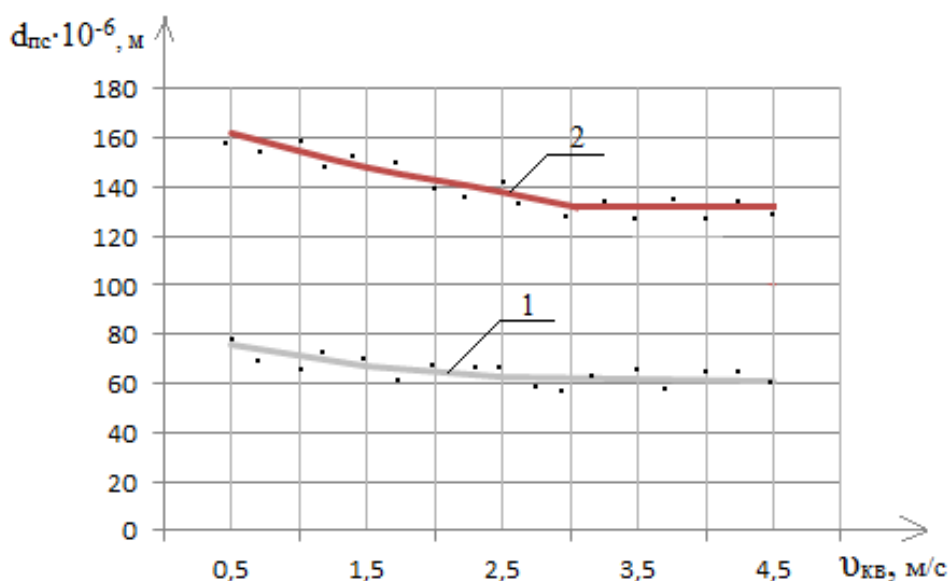


Рис. 3.11. Зависимости величины среднего диаметра пузырьков воздуха в водовоздушной смеси, прошедшей обработку в роторно-кавитационном устройстве, $d_{nc} \cdot 10^{-6}$ (м) от величины скорости водовоздушной смеси в патрубке входа $v_{кв}$ (м/с) и материала поверхности ротора при газонаполнении исходной водовоздушной смеси $\varphi = 0,5$ и скорости движения ротора $v_{ок} = 3,0$ м/с:
 1 – поверхность ротора, покрытая силикатной эмалью марки МК-5;
 2 – необработанная поверхность ротора

3.4. Оценка достоверности полученных экспериментальных данных. Разработка математических зависимостей, описывающих процесс диспергирования водовоздушной смеси в роторно-кавитационном устройстве

Все этапы лабораторных исследований технологии диспергирования водовоздушной смеси в роторно-кавитационном устройстве проводились с повторением в трех сериях опытов, выполняемых в одинаковых условиях. Достоверность полученных экспериментальных результатов оценивалась по их воспроизводимости в сериях опытов, при этом производились вычисление и анализ следующих показателей [23]:

1. Среднеарифметического значения определяемого параметра X_i при числе повторенных опытов $n=3$ ($n < 30$).

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^3 X_i}{n} \quad (3.10)$$

2. Величины отклонения для данного измерения:

$$a_i = X_i - \bar{X}. \quad (3.11)$$

3. Величины среднеквадратичной ошибки серии опытов:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 a_i^2}{n-1}} \quad (3.12)$$

4. Ошибки репрезентативности серии опытов:

$$m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (3.13)$$

5. Погрешности серии опытов с числом степеней свободы $\nu=n-1=3-1=2$ при требовании надежности измерения $\beta=0,95$ и показателе надежности (стандартном значении критерия Стьюдента) $T=3,2$

$$\Delta = m \cdot T. \quad (3.14)$$

6. Коэффициента вариации серии опытов:

$$K_v = \frac{100\sigma}{\bar{X}}, \% \quad (3.15)$$

Обработка среднеарифметических значений опытных данных, полученных в трех сериях опытов по методу наименьших квадратов, позволила выявить математическую зависимость величины среднего диаметра пузырьков

воздуха в водовоздушной смеси, прошедшей обработку в роторно-кавитационном устройстве, d_{nc} , м, от величины окружной скорости движения ротора $v_{ок}$, м/с [18,19,20,21]:

$$d_{ПС} = A v_{ок}^B. \quad (3.16)$$

Величины эмпирических коэффициентов А и В были определены по формуле

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n \ln v_{ок.i} \sum_{i=1}^n \ln d_{ПС.i} - n \sum_{i=1}^n \ln v_{ок.i} \ln d_{ПС.i}}{\left(\sum_{i=1}^n v_{ок.i} \right)^2 - n \cdot \sum_{i=1}^n (\ln v_{ок.i})^2}, \quad (3.17)$$

$$A = \ell \frac{\sum_{i=1}^n \ln d_{ПС.i} - B \sum_{i=1}^n \ln v_{ок.i}}{n}. \quad (3.18)$$

Для роторно-кавитационного устройства с ротором, покрытым силикатной эмалью марки МК-5, при $\varphi = 0,5$ и $v_{кв} = 3,0$ м/с была получена следующая зависимость:

$$d_{nc} = 83,298 \cdot 10^{-6} v_{ок}^{-0,264}. \quad (3.19)$$

Для роторно-кавитационного устройства с ротором, имеющим необработанную поверхность, при $\varphi = 0,5$ и $v_{кв} = 3,0$ м/с была получена следующая математическая зависимость:

$$d_{ПС} = 168,185 \cdot 10^{-6} v_{ок}^{-0,192}. \quad (3.20)$$

Аналогичным способом были получены математические зависимости величины среднего диаметра пузырьков воздуха в водовоздушной смеси, прошедшей обработку в роторно-кавитационном устройстве, $d_{ПС}$, м, от величины газонаполнения исходной водовоздушной смеси φ и скорости водовоздушной смеси в трубке камеры входа $v_{кв}$, м/с.

Для роторно-кавитационного устройства с ротором, покрытым силикатной эмалью марки МК-5, при $v_{кв} = 3,0$ м/с, $\varphi = 0,5$ и $v_{ок} = 3,0$ м/с были получены следующие математические зависимости:

$$d_{ПС} = 59,582 \cdot 10^{-6} \varphi^{-0,057}, \quad (3.21)$$

$$d_{ПС} = 70,272 \cdot 10^{-6} v_{кв}^{-0,114}. \quad (3.22)$$

Для роторно-кавитационного устройства с ротором, имеющим необработанную поверхность, при $v_{кв} = 3,0$ м/с, $\varphi = 0,5$ и $v_{ок} = 3,0$ м/с были получены следующие зависимости:

$$d_{ПС} = 131,744 \cdot 10^{-6} \varphi^{-0,0476}, \quad (3.23)$$

$$d_{ПС} = 151,497 \cdot 10^{-6} v_{кв}^{-0,0967}. \quad (3.24)$$

Математическая зависимость величины среднего диаметра пузырьков воздуха $d_{ПС}$, м, в водовоздушной смеси, прошедшей обработку в роторно-кавитационном устройстве с ротором, покрытым силикатной эмалью марки МК-5, от величины окружной скорости движения ротора $v_{ок}$, м/с, скорости водовоздушной смеси в патрубке входа $v_{ок}$, м/с, и газонаполнения φ будет иметь вид:

$$d_{ПС} = 90,754 \cdot 10^{-6} v_{ок}^{-0,264} v_{кв}^{-0,114} \varphi^{-0,0574}. \quad (3.25)$$

Для роторно-кавитационного устройства с ротором, имеющим необработанную поверхность:

$$d_{ПС} = 180,966 \cdot 10^{-6} v_{ок}^{-0,192} v_{кв}^{-0,0967} \varphi^{-0,0476}. \quad (3.26)$$

Выводы

1. Обработка водовоздушной смеси, полученной при пропускании промывочных сточных вод машиностроительного предприятия через эжектор в роторно-кавитационном устройстве, является эффективным способом ее диспергирования, позволяющим получить мелкодисперсную водовоздушную смесь ($d_{ПС} = 56-100$ мкк) с высоким газонаполнением ($\varphi = 0,06-0,11$).

2. Покрытие ротора роторно-кавитационного устройства силикатной эмалью марки МК-5 позволяет уменьшить средний диаметр воздушных пузырьков $d_{ПС}$ в диспергированной водовоздушной смеси в 1,90 – 2,25 раза и повысить ее газонаполнение в 2,75 -6,0 раз.

3. Увеличение окружной скорости вращения ротора роторно-кавитационного устройства с $v_{ок} = 0,5$ м/с до $v_{ок} = 4,5$ м/с приводит к уменьшению среднего диаметра пузырьков воздуха в диспергированной водовоздушной смеси в 1,52–1,79 раза и повышению ее газонаполнения в 1,834,0 раза.

4. Повышение газонаполнения водовоздушной смеси, подаваемой в роторно-кавитационное устройство, с $\varphi = 0,1$ до $\varphi = 0,7$ позволяет уменьшить средний диаметр воздушных пузырьков в диспергированной водовоздушной смеси в 1,10 – 1,11 раза.

5. Увеличение скорости подачи водовоздушной смеси в камеру входа роторно-кавитационного устройства с $v_{ко} = 0,5$ м/с до $v_{вк} = 4,5$ м/с приводит к снижению размеров водовоздушных пузырьков $d_{ПС}$ в диспергированной водовоздушной смеси в 1,24-1,29 раза.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ДИСПЕРГИРОВАННОЙ ВОДОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ПОЛЕ ДЕЙСТВИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ И РЕАГЕНТНОЙ ФЛОТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД НА НАПОРНОМ ГИДРОЦИКЛОНЕ

4.1. Программа и методика проведения экспериментальных исследований процессов разделения диспергированной водовоздушной смеси в поле действия центробежных сил и реагентной флотационной очистки нефтесодержащих сточных вод на напорном гидроциклоне

4.1.1. Описание установки для проведения исследований процесса разделения диспергированной водовоздушной смеси в поле действия центробежных сил

Исследования процесса разделения диспергированной водовоздушной смеси в поле действия центробежных сил проводились на установке, схема которой представлена на рис. 4.1.

На рис. 4.2 приведен общий вид установки для экспериментальных исследований процесса разделения диспергированной водовоздушной смеси в поле действия центробежных сил.

Разделение диспергированной водовоздушной смеси, поступающей из роторно-кавитационного устройства под остаточным напором, осуществлялось в напорном гидроциклоне, конструктивная схема которого представлена на рис. 4.3.

Напорный гидроциклон для разделения диспергированной водовоздушной смеси содержит камеру входа 1, корпус гидроциклона 2, камеру выхода очищенных сточных вод 3 и патрубки для подвода водовоздушной смеси 4, отвода водовоздушной смеси 5, отвода очищенных сточных вод 6.

Напорный гидроциклон работает следующим образом. Диспергированная водовоздушная смесь, образующаяся на выходе из роторно-кавитационного устройства под остаточным напором, поступает во входной патрубок 4, тангенциально присоединенный к камере входа гидроциклона 1.

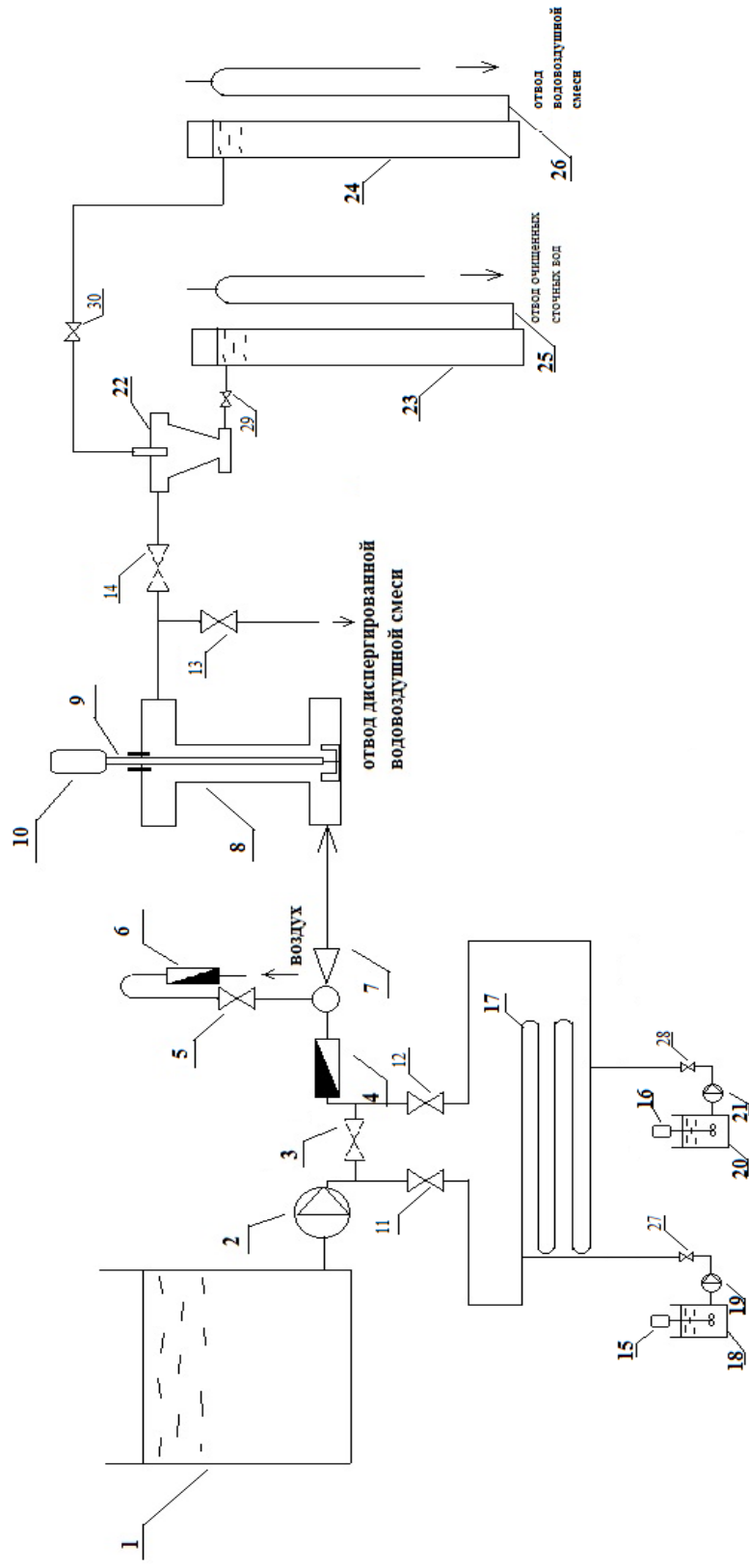


Рис. 4.1. Схема установки для исследования процесса разделения диспергированной водовоздушной смеси в поле действия центробежных сил.

1 – бак для промывочных сточных вод машиностроительного предприятия; 2 – насос; 3, 5, 11-14, 27, 28, 29, 30 – запорная арматура; 4 – расходомер перекачиваемых сточных вод; 6 – поплавковый ротаметр для контроля расхода подкашиваемого воздуха; 7 – водовоздушный эжектор; 8 – роторно-кавитационное устройство; 9 – ротор; 10 – электродвигатель; 15, 16 – механические мешалки; 17 – трубчатый смеситель; 18 – расходный бак известкового молока; 19 – насос-дозатор известкового молока; 20 – расходный бак флокулянта; 21 – насос-дозатор флокулянта; 22 – напорный гидроциклон; 23, 24 – стеклянные колонны; 25 – патрубок для отвода очищенных сточных вод; 26 – патрубок для отвода водовоздушной смеси



Рис. 4.2. Общий вид установки для экспериментальных исследований процесса разделения диспергированной водовоздушной смеси в поле действия центробежных сил

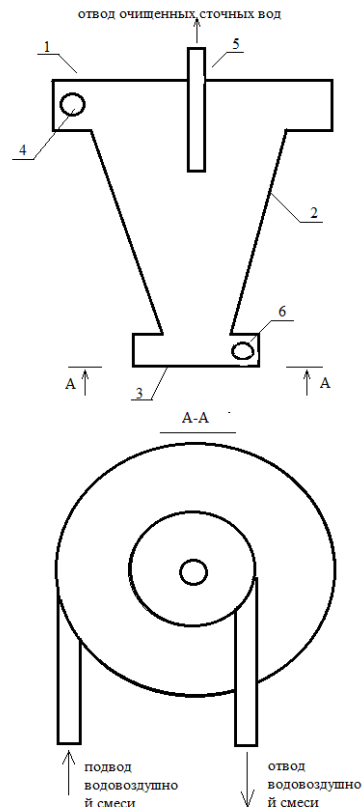


Рис. 4.3. Конструктивная схема напорного гидроциклона для разделения диспергированной водовоздушной смеси:
 1 – камера входа водовоздушной смеси; 2 – корпус гидроциклона; 3 – камера выхода очищенных сточных вод; 4 – патрубок для подвода водовоздушной смеси; 5 – патрубок для отвода водовоздушной смеси; 6 – патрубок для отвода очищенных сточных вод

За счет тангенциальной подачи диспергированной водовоздушной смеси в камере входа 1 создается вращательное движение потока. При выходе вращающегося потока водовоздушной смеси из камеры входа в соосно присоединенный к ней корпус гидроциклона, имеющий меньший диаметр, угловая скорость вращения смеси увеличивается пропорционально квадрату отношения диаметров камеры входа 1 и корпуса гидроциклона 2. В процессе вращательно-поступательного движения водовоздушной смеси в коническом корпусе гидроциклона угловая скорость движения смеси также увеличивается, при этом возникают два основных потока: внешний, движущийся вдоль стенки аппарата по направлению к камере выхода 3, и внутренний, направленный в противоположную сторону. На пузырьки воздуха в водовоздушной смеси, находящейся во вращательно-поступательном движении в корпусе циклона 2, действует центробежная сила, в результате чего

они радиально перемещаются к оси аппарата, подхватываются внутренним потоком и выносятся с потоком водовоздушной смеси через патрубок 5. Очищенные сточные воды поступают в камеру выхода 3, где происходит гашение вращательной составляющей потока, и выводятся через патрубок 6.

Целью проведения исследований являлось определение оптимальных параметров процессов разделения диспергированной водовоздушной смеси в поле действия центробежных сил и реагентной флотационной очистки нефтесодержащих сточных вод на напорном гидроциклоне.

4.1.2. Программа и методика проведения экспериментальных исследований процессов разделения диспергированной водовоздушной смеси в поле действия центробежных сил и реагентной флотационной очистки нефтесодержащих сточных вод на напорном гидроциклоне

Исследования процесса разделения водовоздушной смеси в поле действия центробежных сил проводились в два этапа.

Программа первого этапа исследований предусматривала изучение процесса разделения диспергированной водовоздушной смеси при ее обработке в напорном гидроциклоне.

Программа второго этапа исследований предусматривала изучение реагентной флотационной очистки сточных вод предприятия машиностроительного профиля в напорном гидроциклоне [20, 24, 25].

В ходе проведения первого этапа исследований решались следующие задачи:

1. Определение целесообразности применения напорного гидроциклона для разделения диспергированной водовоздушной смеси.

2. Установление влияния скорости водовоздушной смеси в патрубке камеры входа гидроциклона $v_{взц}$ на эффективность процесса ее разделения.

3. Выявление зависимости эффективности процесса разделения водовоздушной смеси в напорном гидроциклоне от величины соотношения расходов отводимой с циклона водовоздушной смеси $Q_{вс}$ и потока осветленной жидкости $Q_{ож}$.

В ходе проведения исследований процесса разделения диспергированной водовоздушной смеси реальные промывные сточные воды машиностроительного предприятия обрабатывались на опытной установке, схема которой представлена на рис. 4.1.

Промывные сточные воды из бака 1 подавались насосом 2 в водовоздушный эжектор 7. Вентиль 3 закрыт. Расход перекачиваемых сточных вод регулировался вентилями 11 и 12 и измерялся расходомерами 4.

Расход подаваемого водовоздушным эжектором 7 воздуха контролировался поплавковым ротаметром 6 и регулировался вентилем 5 таким образом, что величина газонаполнения водовоздушной смеси, подаваемой в роторно-кавитационное устройство 8, составляла $\varphi = 0,5$.

Величина скорости водовоздушной смеси в патрубке камеры входа роторно-кавитационного устройства 8 поддерживалась на уровне $v_{кв} = 3$ мс. Величина окружной скорости поверхности ротора, покрытой силикатной эмалью МК-5, в роторно-кавитационном устройстве устанавливалась на уровне $v_{ок} = 3,0$ мс. Расход диспергированной водовоздушной смеси, подаваемой на напорный гидроциклон 22, регулировался вентилями 13 и 14.

Величина относительного расхода гидроциклона $\bar{Q}_{ци} = \frac{Q_{вс}}{Q_{ож}}$, определяющего соотношение расходов отводимой с циклоном водовоздушной смеси $Q_{вс}$, м³/с, и потока осветленной жидкости $Q_{ож}$, м³, регулировалась вентилями 29 и 30.

Проскок водовоздушной смеси из камеры выхода гидроциклона 22 контролировался с помощью стеклянной колонны 23, которая использовалась для определения величины коэффициента газонаполнения водовоздушной смеси, отводимой с гидроциклона 22.

В ходе проведения второго этапа исследований решались следующие задачи:

1. Определение эффективности метода реагентной флотационной обработки промывных сточных вод предприятия машиностроительного профиля в напорном гидроциклоне.

2. Установление влияния дозы коагулянта на эффективность флотационной очистки промывных сточных вод предприятия машиностроительного профиля.

3. Выявление зависимости эффективности процесса флотационной очистки промывных сточных вод предприятия машиностроительного профиля от дозы флокулянта.

Исследования флотационной очистки сточных вод предприятия машиностроительного профиля проводились на опытной установке, схема которой представлена на рис. 4.1. Исходная концентрация нефтепродуктов в сточных водах $C_{нт} = 470$ мг/л, концентрация взвешенных веществ $C_{вв} = 3100$ мг/л. Вентиль 3 закрывался. Расход сточных вод, перекачиваемых насосом 2, регулировался вентилями 11 и 12. Вентилями 13, 14 и 29, 30 устанавливалась оптимальная величина относительного расхода гидроциклона $\bar{Q}_{ци}$, значение которой определялось на первом этапе исследований.

Насосом-дозатором 19 в трубчатый смеситель 17 из расходного бака коагулянта 18 подавался коагулянт. В качестве коагулянта использовался раствор известкового молока. Доза коагулянта по товарному продукту (негашеная известь ГОСТ 9179-77) изменялась в пределах $D_u = 50-450$ мг/л.

Насосом-дозатором 21 в трубчатый смеситель 17 из расходного бака 20 подавался флокулянт. В качестве флокулянта использовался катионоактивный сополимер акриламида АК636Р КП-555, выпускаемый по ТУ 2216-012-

55373366-2007. Доза флокулянта по товарному продукту составляла $D_{\phi} = 0,25\text{--}4$ мг/л.

Очищенные сточные воды собирались из патрубка 25 стеклянной колонны 23 и направлялись на химический анализ.

В процессе проведения экспериментальных исследований флотационной очистки промывных сточных вод машиностроительного предприятия контролировались следующие показатели: концентрация нефтепродуктов; содержание взвешенных веществ. Содержание нефтепродуктов контролировалось гравиметрическим способом. Определение концентрации взвешенных веществ проводили методом фильтрования через беззольный бумажный фильтр (белая лента).

4.2. Результаты экспериментальных исследований процесса разделения диспергированной водовоздушной смеси в поле действия центробежных сил

Результаты экспериментальных исследований зависимости критической величины относительного расхода гидроциклона $\bar{Q}_{\text{гц}}$, при которой наблюдался проскок водовоздушной смеси в отводимых с камеры выхода сточных водах, от скорости водовоздушной смеси в патрубке камеры входа $Q_{\text{ц.в}}$ представлены в виде графика, изображенного на рис. 4.4.

Результаты экспериментальных исследований зависимости величины газонаполнения отводимой с гидроциклона водовоздушной смеси $\varphi_{\text{гц}}$ от величины относительного расхода гидроциклона $\bar{Q}_{\text{гц}}$ и скорости водовоздушной смеси в патрубке камеры входа $v_{\text{вгц}}$ представлены в виде графиков на рис. 4.5.

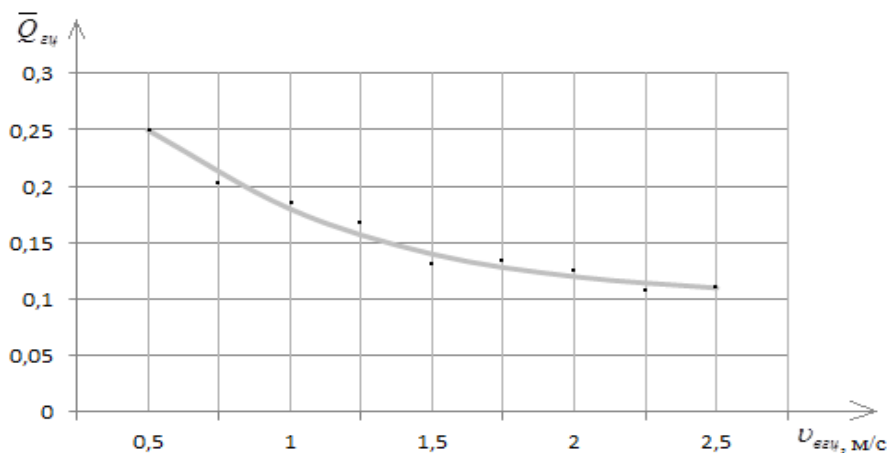


Рис.4.4. Зависимость критической величины относительного расхода гидроциклона $\bar{Q}_{\text{гц}}$, при котором наблюдается проскок водовоздушной смеси в отводимых с камеры выхода гидроциклона сточных вод от скорости водовоздушной смеси в патрубке камеры входа гидроциклона $v_{\text{вгц}}$

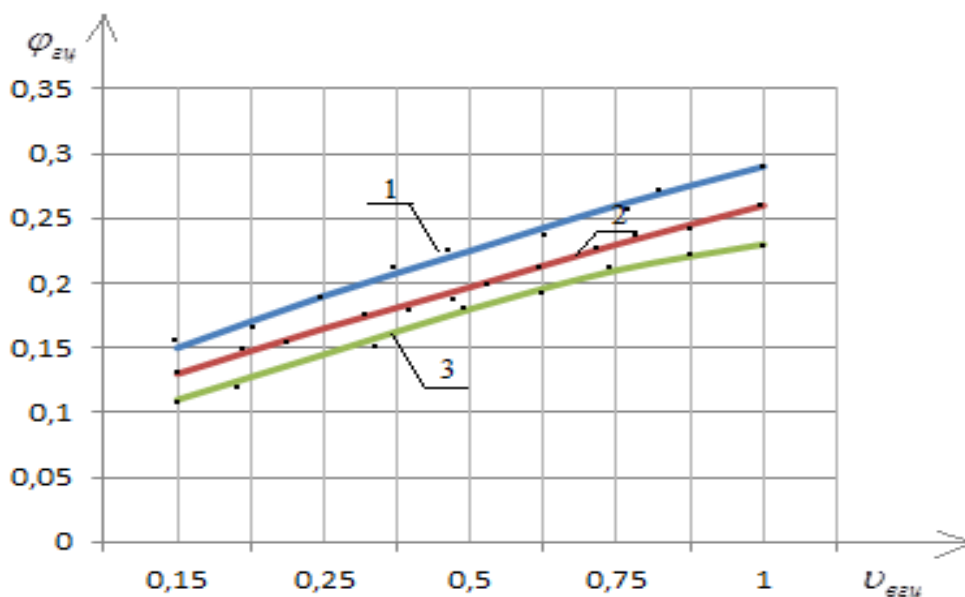


Рис. 4.5. Зависимость величины газонаполнения отводимой с гидроциклона водовоздушной смеси $\phi_{гц}$ от величины относительного расхода гидроциклона $\bar{Q}_{гц}$ и скорости водовоздушной смеси в патрубке камеры входа гидроциклона $v_{вгц}$:
 1 – $v_{вгц} = 1$ м/с; 2 – $v_{вгц} = 1,5$ м/с; 3 – $v_{вгц} = 2$ м/с

Анализируя данные, представленные на графиках, изображенных на рис. 4.4 и 4.5, можно сделать следующие выводы: напорный гидроциклон предложенной конструкции является эффективным аппаратом для разделения диспергированной водовоздушной смеси; оптимальная величина относительного расхода гидроциклона $\bar{Q}_{гц} = 0.15$ при скорости водовоздушной смеси в патрубке камеры входа $v_{вгц} = 1,5$ м/с.

Результаты экспериментальных исследований зависимости концентрации нефтепродуктов $C_{нп}$, мг/л, и взвешенных веществ $C_{вв}$, мг/л, в сточных водах на выходе из напорного гидроциклона от дозы коагулянта D_k , мг/л, представлены в виде графиков, изображенных на рис. 4.6.

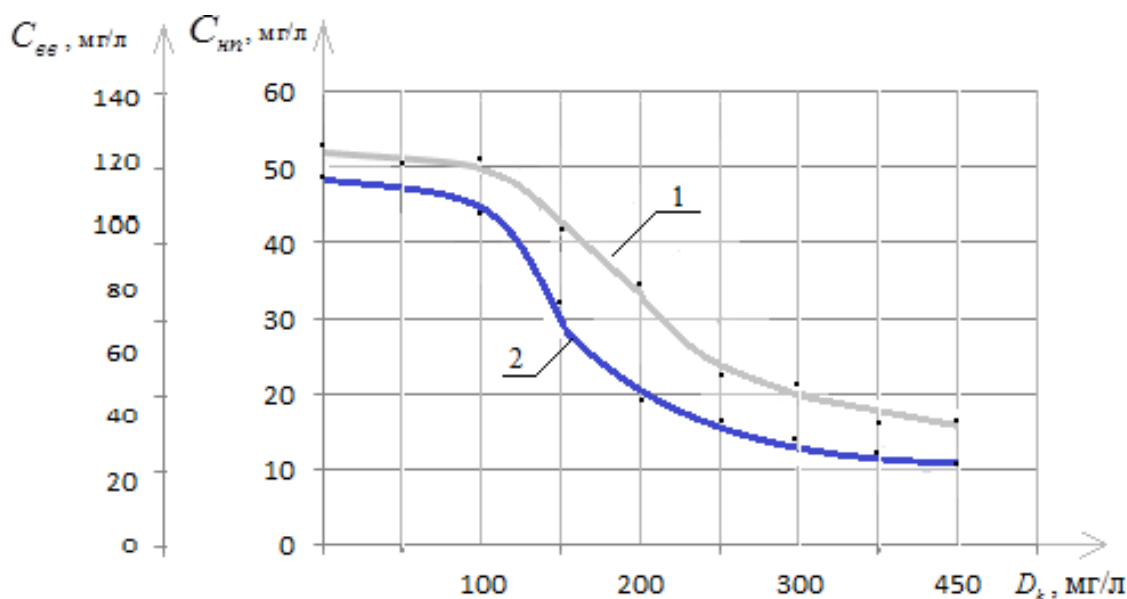


Рис. 4.6. Зависимости величин концентраций нефтепродуктов $C_{нп}$, мг/л, и взвешенных веществ $C_{вв}$, мг/л, в сточных водах на выходе из напорного гидроциклона от дозы коагулянта D_k мг/л:
 1 – концентрация нефтепродуктов $C_{нп}$, мг/л;
 2 – концентрация взвешенных веществ $C_{вв}$, мг/л

Результаты экспериментальных исследований зависимости концентрации нефтепродуктов $C_{нп}$, мг/л, и взвешенных веществ $C_{вв}$ в сточных водах на выходе из напорного гидроциклона от дозы коагулянта D_k , мг/л (при дозе коагулянта $D=250$ мг/л) представлены в виде графиков, изображенных на рис. 4.7.

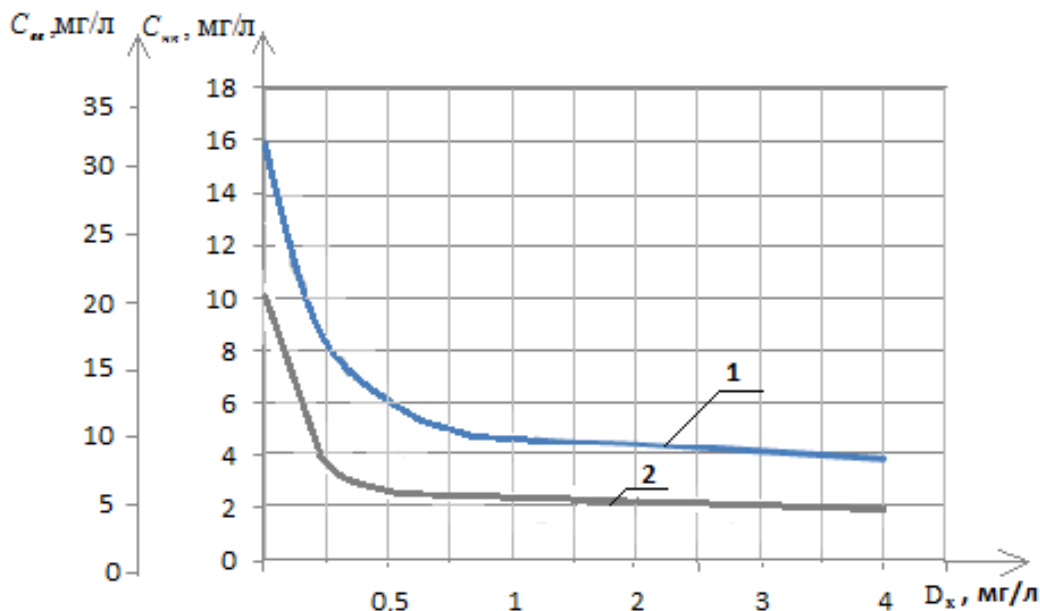


Рис. 4.7. Зависимости концентрации нефтепродуктов $C_{нп}$, мг/л, и взвешенных веществ $C_{вв}$, мг/л, в сточных водах на выходе из напорного гидроциклона от дозы коагулянта (при дозе коагулянта $D_k=250$ мг/л):
 1 – концентрация нефтепродуктов $C_{нп}$, мг/л;
 2 – концентрация взвешенных веществ $C_{вв}$, мг/л

Обработка экспериментальных данных, полученных в ходе исследования процессов разделения диспергированной водовоздушной смеси в напорном гидроциклоне и реагентной флотационной очистки сточных вод по методу наименьших квадратов, позволила получить следующие математические зависимости:

1. Зависимость критической величины относительного расхода гидроциклона $\bar{Q}_{гц}$, при которой наблюдается проскок водовоздушной смеси в отводимых с камеры выхода гидроциклона сточных водах, от скорости водовоздушной смеси в патрубке входа гидроциклона $v_{вгц}$, м/с (при $v_{вгц} = 0,5-2,5$ м/с)

$$\bar{Q}_{гц} = 0,176 \cdot v_{вгц}^{-0,510}. \quad (4.1)$$

2. Зависимость величины газонаполнения отводимой с гидроциклона водовоздушной смеси $\varphi_{гц}$ от величины относительного расхода гидроциклона $\bar{Q}_{гц}$ и скорости водовоздушной смеси в патрубке камеры входа гидроциклона $v_{вгц}$, м/с (при $v_{вгц} = 0,5 - 2,5$ м/с; $\bar{Q}_{гц} = 0,11 - 1,0$)

$$\varphi_{гц} = 0,23 v_{вгц}^{0,334} \bar{Q}_{гц}^{0,358} \quad (4.2)$$

3. Зависимость величины концентрации нефтепродуктов $C_{нп}$, мг/л, в сточных водах на выходе из напорного гидроциклона от дозы коагулянта D_k , мг/л, и дозы флокулянта D_f , мг/л (при $D_k = 250-450$ мг/л и $D_f = 0-4$ мг/л)

$$C_{нп} = 238,014 D_k^{-0,438} (1 - 0.668 D_f^{0,0959}), \text{ мг/л.} \quad (4.3)$$

4. Зависимость величины концентрации взвешенных веществ $C_{вв}$, мг/л, в сточных водах на выходе из напорного гидроциклона от дозы коагулянта D_k , мг/л, и дозы флокулянта D_f , мг/л (при $D_k = 250-450$ мг/л и $D_f = 0-4$ мг/л)

$$C_{вв} = 855,492 D_k^{-0,607} (1 - 0.725 D_f^{0,0458}), \text{ мг/л.} \quad (4.4)$$

Выводы

1. Напорный гидроциклон предложенной конструкции позволяет эффективно разделять диспергированную в роторно-кавитационном устройстве водовоздушную смесь.

2. Значение критической величины относительного расхода гидроциклона, при которой наблюдается проскок водовоздушной смеси в отводимых с камеры выхода гидроциклона сточных водах, увеличивается с $\bar{Q}_{гц} = 0,11$ до $\bar{Q}_{гц} = 0,25$ при снижении величины скорости диспергированной водовоздушной смеси в патрубке входа гидроциклона с $v_{вгц} = 2,5$ м/с до $v_{вгц} = 0,5$ м/с.

3. Обработка диспергированной водовоздушной смеси в напорном гидроциклоне является эффективным методом реагентной флотационной очистки промывных сточных вод предприятия машиностроительного профиля, позволяющим снизить концентрацию взвешенных веществ в 456 раз и концентрацию нефтепродуктов в 124 раза.

4. Использование коагулянта (известкового молока) при дозе $D_k = 250-450$ мг/л в процессе флотационной очистки сточных вод предприятия машиностроительного профиля на напорном гидроциклоне позволяет снизить концентрации загрязняющих веществ в очищенных сточных водах: взвешенных веществ – с $C_{вв} = 85-180$ мг/л до $C_{вв} = 21-30$ мг/л; нефтепродуктов – с $C_{нп} = 44-52$ мг/л до 12-16 мг/л.

5. Дополнительное использование флокулянта (катионоактивного полимера полиакриламида КП-555) при дозе $D_f = 1-4$ мг/л в процессе флотационной очистки сточных вод предприятия машиностроительного профиля на напорном гидроциклоне позволяет снизить концентрации загрязняющих веществ в очищенных сточных водах: взвешенных веществ – с $C_{вв} = 21-30$ мг/л до $C_{вв} = 4,8-6,8$ мг/л; нефтепродуктов – с $C_{нп} = 12-16$ мг/л до $C_{нп} = 2,8-3,8$ мг/л.

5. ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФЛОТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ПРОМЫВОЧНЫХ СТОЧНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОТОРНО-ДИСПЕРГИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

5.1. Производственное внедрение технологии флотационной очистки промывочных сточных вод с использованием роторно-диспергирующего устройства на локальных очистных сооружениях ОАО «Пензтяжпромарматура»

Производственное внедрение технологии флотационной очистки промывочных сточных вод ОАО «Пензтяжпромарматура», предусматривающей использование роторно-кавитационного устройства, было осуществлено в процессе проектирования и строительства локальных очистных сооружений.

Среднее количество промывных сточных вод, образующихся в течение суток на предприятии, составляет 40 м^3 .

Концентрации загрязняющих веществ в промывных сточных водах ОАО «Пензтяжпромарматура» и требования к качеству исходных промывочных растворов представлены в табл. 3.1.

Проектом локальных канализационных очистных сооружений предусматривается повторное использование очищенных сточных вод в качестве промывочных растворов после добавления в них необходимого количества реагентов.

Среднечасовой расход сточных вод, поступающих на локальные канализационные очистные сооружения промывных сточных вод, составляет $Q_{ст} = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Расчетная продолжительность работы локальных канализационных очистных сооружений промывных сточных вод в течение суток $T_{ц} = 8 \text{ ч}$.

На основании проведенных экспериментальных исследований была разработана следующая технологическая схема физико-химической очистки сточных вод от промывочных ванн ОАО «Пензтяжпромарматура» (рис. 5.1).

Промывные сточные воды самотеком поступают в приемный резервуар-усреднитель 1, где происходит усреднение концентрации содержащихся в них загрязнений. Приемный резервуар-усреднитель 1 оснащен гидравлической системой перемешивания 3. Погружной насос 2 подает сточные воды в систему гидравлического перемешивания 3 и трубчатый смеситель 5. Последний смеситель в связи со значительной площадью раздела фаз «жидкость – стенка» позволяет существенно интенсифицировать процессы перемешивания сточных вод с реагентами на микроуровне.

В трубчатый смеситель 5 насосом-дозатором 29 из растворного-расходного бака коагулянта 25 подается известковое молоко.

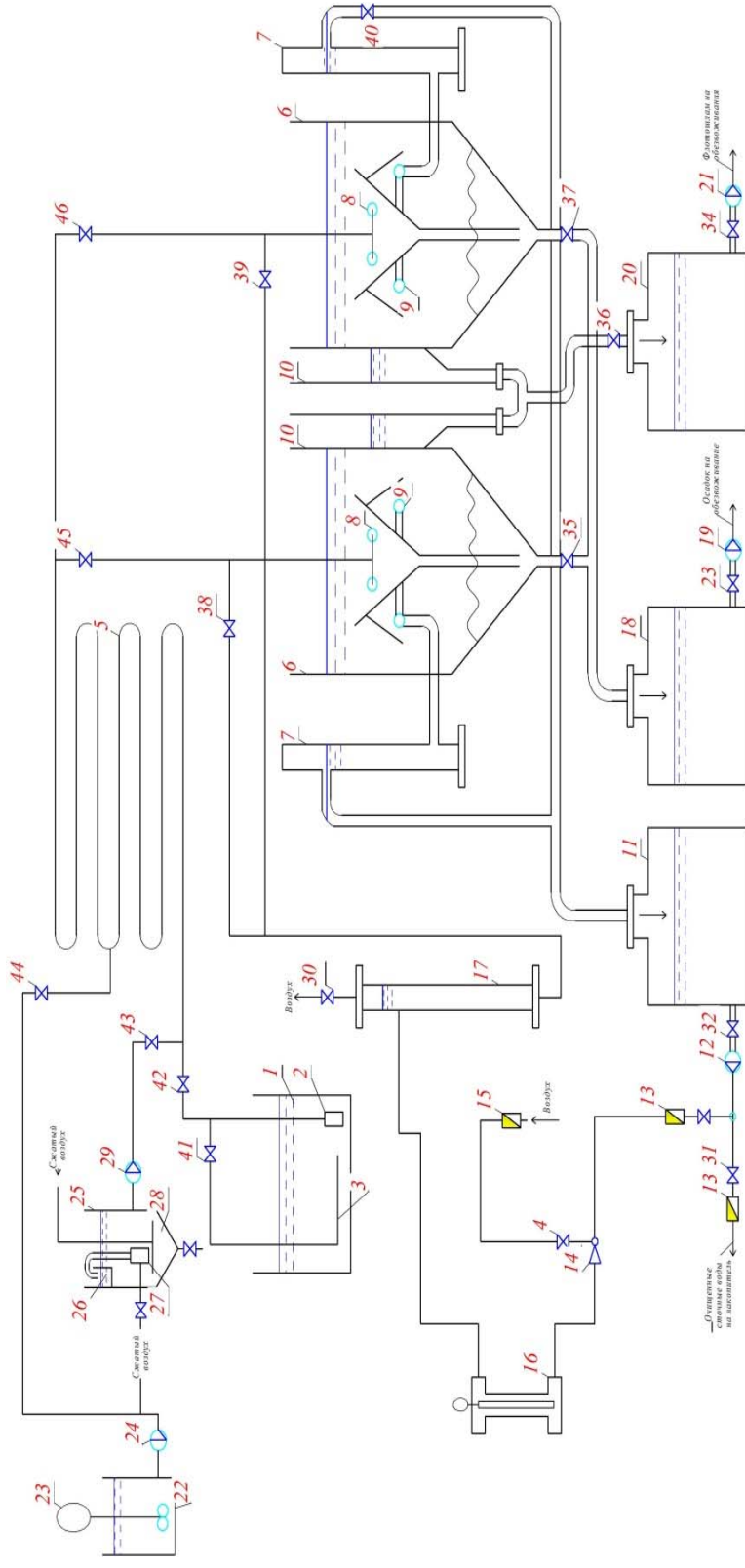


Рис. 5.1. Технологическая схема физико-химической очистки сточных вод от промывочных ванн ОАО «Пентяжпромартматура»:

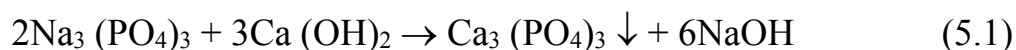
- 1 – приемный резервуар-усреднитель отработанных промывных сточных вод; 2 – погружной насос; 3 – система гидравлического перемешивания; 4, 31–46 – запорная арматура; 5 – трубчатый смеситель; 6 – гидроциклон флотации;
- 7 – стояк очищенных сточных вод; 8 – система подачи сточных вод в циклон; 9 – кольцевая система для сбора очищенных сточных вод; 10 – карман для сбора очищенных сточных вод; 11 – бак для сбора очищенных сточных вод; 12 – насос для перекачки очищенных сточных вод; 13 – расходомер очищенных сточных вод; 14 – водовоздушный эжектор; 15 – ротамер;
- 16 – роторно-кавитационное устройство; 17 – стояк-классификатор фракций водовоздушной смеси; 18 – бак для сбора осадка; 19 – насос для перекачки флотошлама; 20 – бак для сбора флотошлама; 21 – насос для перекачки флотошлама; 22 – растворено-расходный бак флокулянта; 23 – механическая мешалка; 24 – насос-дозатор флокулянта; 25 – растворено-расходный бак известкового молока; 26 – карман для коагулянта; 27 – эрлифт; 28 – система пневматического перемешивания; 29 – насос-дозатор коагулянта; 30 – вантуз

Растворно-расходный бак 25 снабжен эрлифтом 27, подающим жидкость в карман 26. Сюда же загружается известь, которая растворяется в процессе фильтрования через нее жидкости, перекачиваемой эрлифтом 27. В трубчатом смесителе под действием известкового молока происходит процесс коагулирования загрязнений сточных вод.

Коагуляция – процесс слипания частиц дисперсной системы при их столкновении в результате теплового движения или перемешивания. В процессе коагуляции образуются агрегаты – более крупные (вторичные) дисперсные частицы, состоящие из скопления мелких (первичных) частиц. Первичные частицы в таких агрегатах соединены силами межмолекулярного взаимодействия непосредственно друг с другом или через прослойку окружающей (дисперсной) среды.

Коагуляция сопровождается прогрессирующим укрупнением частиц и уменьшением их общего числа в объеме жидкости.

В результате обработки сточных вод известью образуются нерастворимые соединения фосфора, выпадающие в осадок, в частности фосфорит.



Образующиеся в обработанных сточных водах микрочастицы – фосфориты и микрохлопья гидроксида кальция – сорбируют на своей поверхности содержащиеся в сточных водах загрязнения. С целью интенсификации процесса хлопьеобразования и флокулирования образовавшихся микрочастиц и микрохлопьев в трубчатый смеситель 5 из растворно-расходного бака 22 насосом-дозатором 24 подается раствор флокулянта.

Растворно-расходный бак 22 оборудован механической мешалкой 23 интенсифицирующей процесс растворения порошкообразного флокулянта.

Флокуляция – процесс интенсивного укрупнения ранее сформированных частиц загрязнений, происходящий под действием высокомолекулярных веществ флокулянтов.

Основным механизмом флокуляции является адсорбция (закрепление) линейных молекул флокулянта на поверхности микрочастиц скоагулированных загрязнений, позволяющая сформировать мостиковые связи между частицами загрязнений и обуславливающая процесс их интенсивного укрупнения.

В качестве флокулянта используется катионоактивный сополимер полиакриламида АК 636 Р КП (ТУ 2216-012-55373366-2007), представляющий собой растворимый в воде линейный полимер, имеющий в своем составе заряженные катионные группы, состоящий из большого числа молекул сополимера акриламида. Относительная молекулярная масса флокулянта достигает пяти миллионов, а длина цепочки в развернутом виде имеет размер до 1 мкм.

Прошедшие коагуляционную и флокуляционную обработку в трубчатом смесителе 5 промывные воды поступают в систему подачи сточных вод 8 циклона-флотатора 6.

В циклоне-флотаторе 6 реализована схема флотационной очистки с выделением пузырьков воздуха под действием центробежного поля из диспергированной водовоздушной смеси, образующейся в рециркуляционном потоке очищенных сточных вод, перекачиваемых насосом 12. Проходя через водовоздушный эжектор 14, рециркуляционный поток очищенных сточных вод подсасывает атмосферный воздух, расход которого измеряется ротаметром 15 и регулируется запорной арматурой. Водовоздушная смесь, получаемая на выходе с эжектора 14, поступает в роторно-кавитационное устройство 16, в котором в результате вращения ротора, поверхность которого покрыта стеклоэмалью, происходит кавитационное диспергирование пузырьков воздуха водовоздушной смеси.

Поскольку в водовоздушной смеси на выходе из роторно-кавитационного устройства 16 присутствуют отдельные пузырьки диаметром более $d_n = 0,5 \cdot 10^{-6}$ м, свободное всплывание которых в объеме циклона-флотатора 6 может создать локальные зоны с повышенной турбулентностью, была предусмотрена ее обработка в стояке-классификаторе фракций 17.

При движении водовоздушной смеси сверху вниз со скоростью 0,15 м/с пузырьки воздуха диаметром менее $d_n = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м увлекаются потоком. Более крупные пузырьки воздуха всплывают на поверхность и лопаются. Избыточный воздух из воздушной пробки, образующейся в верхней части стояка 17, удаляется посредством вантуза 30.

Полученная таким образом диспергированная водовоздушная смесь подается в поток сточных вод, прошедших реагентную обработку.

Система подачи сточных вод 8 представляет собой ряд сопел, выполненных в виде «сегнерова» колеса. Выходя из сопел со скоростью 2-3 м/с, поток водовоздушной смеси приобретает вращательное движение и перемещается снизу вверх вдоль образующей конуса. Возникающие при вращательно-поступательном движении водовоздушной смеси центробежные силы интенсифицируют процессы образования флотоагрегатов «загрязняющая частица – пузырек воздуха» и их всплывания на поверхность жидкости во флотаторе-отстойнике. Образующийся на поверхности жидкости пенный слой собирается в карман 10, где в процессе гашения пены образуется флотоконденсат, который отводится в бак 20. Флотоконденсат из бака 20 периодически откачивается насосом 21 на участок мехобезвоживания.

Часть скоагулированных загрязнений выпадает на дно циклона-флотатора 6. Образовавшийся осадок под гидростатическим давлением отводится в бак 18. Насосом 19 осадок из бака 18 перекачивается на участок мехобезвоживания. Очищенные сточные воды собираются кольцевой системой 9 в бак 11, откуда насосом 12 они перекачиваются в бак-накопитель. После добавления в очищенные сточные воды необходимого количества реагентов они повторно используются в качестве промывочных растворов.

Результаты, полученные от внедрения технологии флотационной очистки промывочных сточных вод с использованием роторно-кавитационного устройства на локальных очистных сооружениях ОАО «Пензтяжпромартатура», представлены в табл. 5.1.

Т а б л и ц а 5 . 1

Результаты, полученные от внедрения технологии флотационной очистки промывочных сточных вод с использованием роторно-диспергирующего устройства на локальных очистных сооружениях
ОАО «Пензтяжпромартатура»

№	Показатели	Концентрации загрязнений в промывных сточных водах, мг/л	Концентрации загрязнений в очищенных сточных водах, мг/л	Эффект очистки, %	Предельно допустимые концентрации в очищенных сточных водах, мг/л
1	2	3	4	5	6
1	Взвешенные вещества	$\frac{1400 - 2000}{1700}$	$\frac{4,6 - 6,2}{5,4}$	99,7	20
2	Нефтепродукты	$\frac{340 - 500}{420}$	$\frac{0,9 - 2,5}{2,05}$	99,5	4,5
3	Железо общее	$\frac{1,5 - 4,0}{2,75}$	$\frac{0,06 - 0,17}{0,1}$	99,4	0,3
4	Уровень pH	10 – 10,5	10 – 10,5	-	-

П р и м е ч а н и е . В знаменателе показано среднее значение рассматриваемого показателя.

Общий вид циклона-флотатора представлен на рис. 5.2.



Рис. 5.2. Общий вид циклона-флотатора

Общий вид локальных очистных сооружений промывных сточных вод показан на рис. 5.3.



Рис. 5.3. Общий вид локальных очистных сооружений промывных сточных вод ОАО «Пензтяжпромарматура»

Сточные воды, прошедшие реагентную флотационную очистку, соответствуют требованиям, предъявляемым к качеству промывочных растворов и могут быть повторно использованы в технологическом процессе. В очищенные сточные воды, находящиеся в баке-накопителе, добавлялись следующие реагенты: сода кальцинированная (ГОСТ 5100–85) в количестве 5 г/л; едкий натр (ГОСТ 2263–79) в количестве 2 г/л; тринатрийфосфат (ГОСТ 201–76) в количестве 10 г/л; препарат ОП-7 (ГОСТ 8433–81) в количестве 1 г/л. После чего они перекачивались в производственный цех для повторного использования.

Полученные в ходе производственных испытаний данные показали, что внедрение технологии реагентной флотационной очистки промывных сточных вод ОАО «Пензтяжпромарматура» позволило:

1. Снизить концентрации загрязняющих веществ в очищенных сточных водах по показателям: взвешенные вещества – в 315 раз; нефтепродукты – в 205 раз; железо – в 28 раз.

2. Сточные воды, прошедшие реагентную флотационную очистку, отвечают требованиям, предъявляемым к качеству промывочных растворов, и после добавления в них необходимого количества реагентов они могут быть повторно использованы в технологическом процессе.

3. Повторное использование очищенных промывочных сточных вод в технологическом процессе позволяет сократить удельный расход следую-

щих реагентов: соды кальцинированной (ГОСТ 5100–85) – на 35 кг/м³; едкого натра (ГОСТ 2263–79) – на 12 кг/м³; тринатрийфосфата (ГОСТ 201–76) – на 60 кг/м³; препарата ОП-7 (ГОСТ 8433–81) – на 4 кг/м³.

5.2. Рекомендации по проектированию и расчету аппаратного оформления предлагаемой технологии.

Расчет экономического эффекта, полученного от внедрения

Суточный расход промывных сточных вод, поступающих на локальные очистные сооружения:

$$Q_{сут} = Q_{ч} \cdot T_{oc}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (5.2)$$

$$Q_{сут} = 5 \cdot 8 = 40 \text{ м}^3/\text{ч},$$

где $Q_{ч} = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$ – часовой расход промывных сточных вод, поступающих на локальные очистные сооружения; $T_{oc} = 8 \text{ ч/сут}$ – продолжительность работы локальных очистных сооружений в течение суток.

Часовой расход сточных вод, поступающих на один циклон-флотатор с учетом рециркуляционного потока очищенных сточных вод:

$$Q_{чф} = \frac{Q_{ч}(1 + K_p)}{N_{ф}}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (5.3)$$

$$Q_{чф} = \frac{5(1 + 0,3)}{2} = 3,25 \text{ м}^3/\text{ч},$$

где $K_p = 0,3$ – коэффициент рециркуляции очищенных сточных вод; $N_{ф} = 2$ шт. – число отстойников-флотаторов.

Площадь поперечного сечения отстойника-флотатора:

$$F_{ф} = \frac{Q_{чф}}{q_y}, \text{ м}^2, \quad (5.4)$$

$$F_{ф} = \frac{3,25}{3,5} = 0,93 \text{ м}^2,$$

где $q_y = 3,5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot 1)$ – удельная гидравлическая нагрузка на циклон-флотатор.

Объем рабочей зоны отстойника-флотатора:

$$W_{ф} = Q_{ч.ф} \cdot T_{ф}, \text{ м}^3, \quad (5.5)$$

$$W_{ф} = 3,25 \cdot 0,5 = 1,6 \text{ м}^3,$$

где $T_\phi = 0,52$ – расчетная продолжительность пребывания сточных вод в отстойной части циклона-флотатора.

Высота циклона-флотатора:

$$H_\phi = \frac{W_\phi}{F_\phi}, \text{ м}, \quad (5.6)$$

$$H_\phi = \frac{1,6}{1,93} = 1,7 \text{ м.}$$

Диаметр циклона-флотатора:

$$D_\phi = \sqrt{\frac{4F_\phi}{\pi}}, \text{ м}, \quad (5.7)$$

$$D_\phi = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,93}{3,14}} = 1,1 \text{ м.}$$

Размер конической части циклона-флотатора:

$$H_{\phi к} = \frac{D_\phi}{2 \operatorname{tg} \alpha}, \text{ м}, \quad (5.8)$$

$$H_{\phi к} = \frac{1,1}{2 \operatorname{tg} 30} = 0,95 \text{ м},$$

где $\alpha = 60^\circ$ – угол конусности нижней части циклона-флотатора.

Общая высота циклона-флотатора:

$$H_{оф} = H_\phi + H_{\phi к}, \text{ м}, \quad (5.9)$$

$$H_{оф} = 1,7 + 0,95 = 2,65 \text{ м.}$$

Расход кальцинированной соды на приготовление промывных растворов в течение года:

$$M_{кс} = \frac{C_{кс} \cdot Q_{сут} \cdot N_{р\delta}}{1000}, \text{ т/год}, \quad (5.10)$$

$$M_{кс} = \frac{40 \cdot 40 \cdot 30}{1000} = 48 \text{ т/год},$$

где $C_{кс} = 40 \text{ кг/м}^3$ – концентрация кальцинированной соды в промывном растворе; $N_{р\delta}$ – число дней работы локальных очистных сооружений в течение года, $N_{р\delta} = 30$.

Расход едкого натра на приготовление промывных растворов в течение года:

$$M_{EH} = \frac{C_{EH} \cdot Q_{сут} \cdot N_{р\partial}}{1000}, \text{ т/ГОД}, \quad (5.11)$$

$$M_{EH} = \frac{15 \cdot 40 \cdot 30}{1000} = 18 \text{ т/ГОД},$$

где $C_{EH} = 15 \text{ кг/м}^3$ – концентрация едкого натра в промывном растворе.

Расход тринатрийфосфата на приготовление промывных растворов в течение года:

$$M_{ТФ} = \frac{C_{ТФ} \cdot Q_{сут} \cdot N_{р\partial}}{1000}, \text{ т/ГОД}, \quad (5.12)$$

$$M_{ТФ} = \frac{70 \cdot 40 \cdot 30}{1000} = 84 \text{ т/ГОД},$$

где $C_{ТФ} = 70 \text{ кг/м}^3$ – концентрация тринатрияфосфата в промывном растворе.

Расход препарата ОП-7 на приготовление промывных растворов в течение года:

$$M_{ОП-7} = \frac{C_{ОП-7} \cdot Q_{сут} \cdot N_{р\partial}}{1000}, \text{ т/ГОД}, \quad (5.13)$$

$$M_{ОП-7} = \frac{5 \cdot 40 \cdot 30}{1000} = 6 \text{ т/ГОД},$$

где $C_{ОП-7} = 5 \text{ кг/м}^3$ – концентрация препарата ОП-7 в промывном растворе.

Масса кальцинированной соды, сэкономленной в течение года в результате повторного использования промывных растворов:

$$\Delta M_{кс} = \frac{(C_{кс} - \Delta C_{кс}) \cdot Q_{сут} \cdot N_{р\partial}}{1000}, \text{ т/ГОД}, \quad (5.14)$$

$$\Delta M_{кс} = \frac{(40 - 5) \cdot 40 \cdot 30}{1000} = 42 \text{ т/ГОД},$$

где $\Delta C_{кс} = 5 \text{ кг/м}^3$ – удельный расход кальцинированной соды, добавляемой в очищенные сточные воды перед их повторным использованием в технологическом процессе.

Масса едкого натра, сэкономленного в течение года в результате повторного использования промывных растворов:

$$\Delta M_{EH} = \frac{(C_{EH} - \Delta C_{EH}) \cdot Q_{сум} \cdot N_{pд}}{1000}, \text{ т/год}, \quad (5.15)$$

$$\Delta M_{EH} = \frac{(15 - 2) \cdot 40 \cdot 30}{1000} = 15,6 \text{ т/год},$$

где $\Delta C_{EH} = 2 \text{ кг/м}^3$ – удельный расход едкого натра, добавляемого в очищенные сточные воды перед их повторным использованием в технологическом процессе.

Масса тринатрийфосфата, сэкономленного в течение года в результате повторного использования промывных растворов:

$$\Delta M_{TФ} = \frac{(C_{TФ} - \Delta C_{TФ}) \cdot Q_{сум} \cdot N_{pд}}{1000}, \text{ т/год}, \quad (5.16)$$

$$\Delta M_{TФ} = \frac{(70 - 10) \cdot 40 \cdot 30}{1000} = 72 \text{ т/год},$$

где $\Delta C_{TФ} = 10 \text{ кг/м}^3$ – удельный расход тринатрийфосфата, добавляемого в очищенные сточные воды перед их повторным использованием в технологическом процессе.

Масса препарата ОП-7, сэкономленного в течение года в результате повторного использования промывных растворов:

$$\Delta M_{ОП-7} = \frac{(C_{ОП-7} - \Delta C_{ОП-7}) \cdot Q_{сум} \cdot N_{pд}}{1000}, \text{ т/год}, \quad (5.17)$$

$$\Delta M_{ОП-7} = \frac{(5 - 1) \cdot 40 \cdot 30}{1000} = 4,8 \text{ т/год},$$

где $\Delta C_{ОП-7} = 1 \text{ кг/м}^3$ – удельный расход препарата ОП-7, добавляемого в очищенные сточные воды перед их повторным использованием в технологическом процессе.

Экономический эффект, полученный от внедрения предложенной технологии:

$$\mathcal{E} = \Delta M_{кc} C_{кc} + \Delta M_{EH} C_{EH} + \Delta M_{TФ} C_{TФ} + \Delta M_{ОП-7} C_{ОП-7}, \text{ руб./год}, \quad (5.18)$$

$$\mathcal{E} = 42 \cdot 16000 + 15,6 \cdot 23000 + 72 \cdot 40000 + 4,8 \cdot 110000 = 4438800 \text{ руб./год},$$

где $C_{кc}, C_{EH}, C_{TФ}, C_{ОП-7}$ – соответственно цены кальцинированной соды, едкого натра, тринатрийфосфата, препарата ОП-7.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ отечественных и зарубежных литературных источников показал, что процессы флотационной очистки нефтесодержащих производственных сточных вод могут быть существенно интенсифицированы при использовании мелкодисперсной водовоздушной смеси ($d_{II} = 20 - 100$ мкм) с повышенной величиной ее газонаполнения.

2. Предложен новый метод, позволяющий получить мелкодисперсную водовоздушную смесь с высоким газонаполнением ($\varphi=0,06-0,11$), предусматривающий обработку водовоздушной смеси, образующейся на выходе с эжектора, в роторно-диспергирующем устройстве.

3. Разработаны математические зависимости, адекватно описывающие процесс диспергирования водовоздушной смеси, образующейся на выходе с эжектора, в роторно-диспергирующем устройстве.

4. Экспериментально доказано, что напорный гидроциклон предложенной конструкции позволяет эффективно разделять диспергированную в роторно-диспергирующем устройстве водовоздушную смесь.

5. Экспериментально установлено, что технология реагентной флотационной очистки промывных сточных вод предприятия машиностроительного профиля на напорном гидроциклоне предложенной конструкции, предусматривающая использование диспергированной водовоздушной смеси, позволяет снизить концентрацию взвешенных веществ в очищенных сточных водах в 456-641 раз, нефтепродуктов в 124-168 раз.

6. Получены математические зависимости, адекватно описывающие процесс реагентной флотационной очистки промывных сточных вод предприятия машиностроительного профиля на напорном гидроциклоне предложенной конструкции, предусматривающей использование диспергированной водовоздушной смеси.

7. Технология флотационной очистки нефтесодержащих производственных сточных вод с использованием роторно-диспергирующего устройства была внедрена в процессе строительства локальных очистных сооружений промывных сточных вод ОАО «Пензтяжпромарматура». Ввод в эксплуатацию локальных очистных сооружений обеспечил снижение концентраций загрязняющих веществ в очищенных сточных водах: взвешенных веществ – до 4,6-6,2 мг/л; нефтепродуктов – до 0,9-2,5 мг/л; железа общего – до 0,06-0,17 мг/л, что позволило после добавления необходимого количества реагентов повторно использовать очищенные промывные сточные воды в технологическом процессе. Суммарный годовой экономический эффект, полученный от промышленного внедрения предложенной технологии флотационной очистки промывных сточных вод, составил более 4430 тыс. руб. в ценах 2016 года.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамов, А.А. Флотационные методы обогащения [Текст] / А.А. Абрамов. – М.: Недра, 1984. – 383 с.
2. Авдохин, В.М. Обратная катионная флотация тонкодисперсных железорудных концентратов [Текст] / В.М. Авдохин, С.Л. Губин // ГИАБ, МГГУ. – 2006. – №6.
3. Аграноник, Р.Я. Биофлотационная и микрофлотационная технологии очистки сточных вод [Текст] / Р.Я. Аграноник, Г.А. Писклов // Водоснабжение и санитарная техника. – 1993. – № 9. – 29 с.
4. Адамсон, А. Физическая химия поверхностей [Текст] / А. Адамсон. – М.: Мир, 1979. – 568 с.
5. Адельшин, А.Б. Интенсификация очистки нефтесодержащих сточных вод на основе применения струйно-отстойных аппаратов [Текст] / А.Б. Адельшин, Н.И. Потехин. – Казань: КГАСА, 1997. – 207 с.
6. Аким, Э.Л. Флотационная очистка стоков целлюлозно-бумажных предприятий как путь к реализации лучших достигнутых технологий (ВАТ-технологий). [Текст] / Э.Л. Аким, А.М. Смирнов // Проблемы устойчивого развития лесного комплекса Северо-Запада России на период до 2015 г.: материалы междунар. науч.-практ. конф. – СПб., 2004. – С. 102-104.
7. Алейников, Н.А. Флотация окислов железа синтетическими карбоновыми кислотами [Текст] // Н.А. Алейников, П.А. Усачев, Г.А. Голованов // Горный журнал. – 1960. – №9.
8. Алексеев, Е.В. Основы технологии очистки сточных вод флотацией [Текст]: моногр. / Е.В. Алексеев. – М.: Изд-во АСВ, 2009. – 136 с.
9. Андреев, С.Ю. Интенсификация работы канализационных очистных сооружений с использованием диспергированных водовоздушных смесей [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / С.Ю. Андреев. – Пенза: ПГАСА, 2007. – 331 с.
10. Андреев, С.Ю. Теоретические основы процессов генерации динамических двухфазных систем вода-воздух и их использование в технологиях очистки воды [Текст]: моногр. / С.Ю. Андреев. – Пенза: ПГУАС, 2005. – 194 с.
11. Андреев, С.Ю. Использование технологии обработки газовой смеси импульсным магнитным полем для интенсификации флотационной очистки сточных вод [Текст] / С.Ю. Андреев, Т.В. Алексеева, В.В. Демидочкин, А.А. Петрунин, И.Б. Ширшин // Проблемы энергосбережения и экологии в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах: материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: ПГУАС, 2012. – С. 23-26.

12. Андреев, С.Ю. Кинетические закономерности процесса флотации из сточных вод без инерционных дисперсных частиц [Текст] / С.Ю. Андреев, И.А. Гарькина, А.М. Исаева, А.А. Петрунин // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №3. – 181 с.

13. Андреев, С.Ю. Теоретические основы процесса диспергирования водовоздушной смеси используемой для флотационной очистки сточных вод [Текст] / С.Ю. Андреев, И.А. Гарькина, А.А. Петрунин // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – №3. – 154 с.

14. Андреев, С.Ю. Лабораторные исследования технологии диспергирования водовоздушной смеси в роторно-кавитационном устройстве [Текст] / С.Ю. Андреев, И.А. Гарькина, А.А. Петрунин, Н.Н. Ласков // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – №3. – 154 с.

15. Андреев, С.Ю. Совершенствование флотационной очистки производственных сточных вод [Текст] / С.Ю. Андреев, И.А. Гарькина, А.А. Петрунин // Региональная архитектура и строительства. – 2014. – №2(19). – 212 с.

16. Андреев, С.Ю. К вопросу гидравлического расчета трубчатого гидравлического флокулятора [Текст] / С.Ю. Андреев, Б.М. Гришин, А.М. Исаева, М.В. Бikuнова, А.А. Петрунин // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – №1. – 174 с.

17. Андреев, С.Ю. Флотационная очистка нефтесодержащих сточных вод предприятий машиностроительного профиля с применением эмалированных вихревых смесительных устройств. Сборник трудов международной научно-практической конференции [Текст] / С.Ю. Андреев, Б.М. Гришин, А.А. Петрунин // Совершенствования работы систем водоснабжения и водоотведения населенных пунктов и промышленных предприятий: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: ПГУАС, 2011. – С. 33-39.

18. Андреев, С.Ю. Математическое моделирование процессов флотации без инерционных дисперсных частиц природных и сточных вод [Текст] / С.Ю. Андреев, В.В. Демидочкин, Н.И. Ишева, А.А. Петрунин // Совершенствования работы систем водоснабжения и водоотведения населенных пунктов и промышленных предприятий: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: ПГУАС, 2011. – С. 308-318.

19. Андреев, С.Ю. Теоритические основы технологии флотационной очистки сточных вод. [Текст] / С.Ю. Андреев, А.М. Исаева, А.А. Петрунин, В.А. Князев // Актуальные проблемы инженерных наук в области промышленности, экологии и охраны водных ресурсов: сб. тр. II междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: ПГУАС, 2013. – С.33-45.

20. Андреев, С.Ю. Математическое моделирование процессов градиентной флокуляции в трубчатых смесительных аппаратах [Текст] / С.Ю. Ан-

дреев, В.Г. Камбург, А.А. Петрунин // Математическое и компьютерное моделирование в решении задач строительства, техники, управления и образования: сб. ст. XVII междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: ПГУАС, 2012. – С. 9-17.

21. Андреев, С.Ю. Математическое моделирование кинетики процессов массопередачи и всплывающих газовых пузырьков в технологиях очистки сточных вод [Текст] / С.Ю. Андреев, В.Г. Камбург, А.А. Петрунин, В.В. Князев, Г.П. Давыдов // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – №3. – 182 с.

22. Андреев, С.Ю. Повышение эффективности флотационной очистки сточных вод за счет использования гидродинамических устройств. [Текст] / С.Ю. Андреев, А.А. Петрунин // Энциклопедия инженера химика. – 2014. – №10. – 46 с.

23. Андреев, С.Ю. Количественная оценка эффективности метода флотационной очистки сточных вод [Текст] / С.Ю. Андреев, А.А. Петрунин // Проблемы энергосбережения и экологии в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах: сб. тр. XV междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: ПГУАС, 2014. – С. 19-21.

24. Андреев, С.Ю. Теоретические основы процессов работы трубчатого гидродинамического флокулятора [Текст] / С.Ю. Андреев, А.А. Петрунин, Г.П. Давыдов, В.А. Князев // Актуальные проблемы инженерных наук в области промышленности, экологии и охраны водных ресурсов: сб. тр. II междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: ПГУАС, 2013. – С. 206-209.

25. Андреев, С.Ю. Математическое моделирование процессов работы трубчатого гидродинамического флокулятора [Текст] / С.Ю. Андреев, А.А. Петрунин, В.А. Князев Г.П. Давыдов, // Актуальные проблемы инженерных наук в области промышленности, экологии и охраны водных ресурсов: сб. тр. междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: ПГУАС, 2012. – С. 72-75.

26. Анопольский, В.Н. Систематизация признаков расчетных схем флотационной очистки воды [Текст] / В.Н. Анопольский, В.М. Рогов, Н.Н. Рулев // Химия и технология воды. – 1982. – №4. – Т. 4. – С. 291-299.

27. Аракчеев, Е.П. О выборе режимов безреагентной флотации [Текст] / Е.П. Аракчеев, В.Н. Покровский // Труды МЭН, 1971. – Вып.83. – С.161-163.

28. Бабенков, Е.Д. Очистка воды коагулянтами [Текст] / Е. Д. Бабенков. – М.: Наука, 1977. – 356 с.

29. Базякина, Н.А. Очистка концентрированных промышленных сточных вод [Текст] / Н.А. Базякина. – М.: Госстойиздат, 1958. – 77 с.

30. Балабышко, А.М., Гидромеханическое диспергирование [Текст] / А.М. Балабышко, А.И. Зимин, В.П. Гужицкий. – М.: Наука 1998. – 332 с.

31. Бекляева З.Г. Очистка сточных вод от нефтепродуктов электрофлотацией [Текст] / З.Г. Бекляева // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья: науч.-техн. реферативный сборник. – М.: ВНИИОЭНГ. – 1978. – № 5. – С. 32-35.

32. Белоглазов, К.Ф. Закономерности флотационного процесса [Текст] / К.Ф. Белоглазов. – М.: Литературное издательство, 1974. – 254 с.

33. Бергер, Г.С. Флотируемость минералов [Текст] / Г.С. Бергер. – М., 1962. – 263 с.

34. Богданов, В.Ф. Флотационная водоочистка с применением струйной аэрации [Текст] / В.Ф. Богданов, О.Я. Евсеев, Ю.А. Заславский / под общ. ред. Ю.А. Заславского. – Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 1991. – С.30-35.

35. Бойко, Г.Г. Изучение собирательных свойств таллового масла и его жирных кислот при флотации вольфрамсодержащих руд [Текст] / Г.Г. Бойко, Л.А. Китинова, В.Ф. Шевякова // Обогащение и металлургическая переработка полиметаллического сырья: сб. науч. тр. – Ташкент: Средазнипроцветмет, 1984. – С. 13-20.

36. Бондарев, А.А. Биологическая очистка промышленных сточных вод в аэротенках с флотационным илоотделителем [Текст] / А.А. Бондарев // Сооружения и технологические процессы механической и биологической очистки промышленных сточных вод: тр. ин-та ВОДГЕО. – М., 1981. – С. 5-10.

37. Бочаров, В.А. Технология кондиционирования и селективной флотации руд цветных металлов [Текст] / В.А. Бочаров, М.Я. Рыскин. – М.: Недра, 1993. – 288 с.

38. Брагинский, Л.Н. Перемешивание в жидких средах [Текст] / Л.Н. Брагинский, В.И. Бигичев, В.М. Барабаш.–Л.: Химия, 1984. – 336 с.

39. Бредихин, А.И. Пневмомеханическое диспергирование газа в жидкость [Текст] / А.И. Бредихин, А.Н. Атрошко // Сооружения для очистки сточных вод и обработки осадков: тр. ин-та ВНИИ ВОДГЕО. – М., 1987. – 158 с.

40. Виноградова, О.И. О прилипанию частиц различной степени гидрофобности к пузырьку при столкновении [Текст] / О.И. Виноградов // Коллоидный журнал. – 1993. – Т. 55. – №4.–С. 21-29.

41. Глембоцкий, В.А. Флотационные свойства кварца [Текст] / В.А. Глембоцкий// Горный журнал. – 1946. – № 4.

42. Глембоцкий, В.А. Флотация [Текст] / В.А. Глембоцкий, В.И. Класен. – М.: Наука, 1973. –384 с.

43. Гогина, Е.С. Ресурсосберегающие технологии промышленного водоснабжения и водоотведения: Справочное пособие [Текст] / Е.С. Гогина, А.Д. Гуринович, Е.А. Урецкий. – М.: Изд-во АСВ, 2012. – С. 23-28.

44. Годен, А.М. Флотация [Текст] / А.М. Годен. – М.: Госгортехиздат, 1959. – 464 с.

45. Гончаренко, Б.И. Моделирование напорной флотации при очистке сточных вод сахарной заводов [Текст] / Б.И. Гончаренко, А.И. Гладкий // Химия и технология воды. –1988. – Т. 10. –№ 6. – С. 552 -554.

46. Городецкая, А.В. Скорость поднятия пузырьков в воде и водных растворах при больших числах Рейнольдса [Текст] / А.В. Городецкая // Журнал физической химии. – М., 1949. – Т. 23. – №1. – С. 71 – 77.

47. Григорьев, А.Б. Интенсификация процесса очистки сточных вод предприятий текстильной и трикотажной промышленности методом пенной флотации [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / А.Б. Григорьев. – М., 1974. – 22 с.

48. Гусар, Ф.Г. Источники загрязнений нефтепродуктами сточных вод тепловых электростанций и методы их очистки [Текст] /Ф.Г. Гусар // В кн.: Очистка сточных вод на электростанциях. – М.: Энергия, 1972. – 198 с.

49. Демидочкин, В.В. Совершенствование систем подачи и распределения воды с применением труб, покрытых эмалью: автореф. дис. ... канд. техн. наук. [Текст] / В.В. Демидочкин. – Пенза: ПГАСА, 2000. – 24 с.

50. Дерягин, В.В. Теория движения минеральных частиц вблизи поверхности всплывающего пузырька в применении к флотации [Текст] / В.В. Дерягин, С.С. Духин // Изв. АН СССР. отдел техн. наук.– Металлургия и топливо. – 1959. – № 1.– С . 82-89.

51. Дерягин, Б.В. Микрофлотация [Текст] / Б.В. Дерягин, С.С. Духин, Н.Н. Рулев. – М.: Химия, 1986. – 112 с.

52. Дерягин, Б.В. Теоретические основы и контроль процессов флотации [Текст] / Б.В. Дерягин, С.С. Духин, Н.Н. Рулев. – М.: Пенза, 1980. – С. 92-118.

53. Дибердеев, Н.Х. Современные направления в конструировании флотационных машин [Текст] / Н.Х. Дибердеев, Ю.Б. Рубинштейн, В.К. Романов. – М.: ЦНИИуголь, 1985. – Вып. 6-48.

54. Дуденков, С.В. Основы теории и практики применения флотационных реагентов [Текст] / С.В. Дуденков, Л.Я. Шубов, Л.А. Глазунов. – М.: Недра, 1969. – 367 с.

55. Духин, С.С. Механизм действия поверхностно-активных веществ в микрофлотации [Текст] / С.С. Духин // Химия и технология воды. – 1987. – Т. 9. – № 6. – С. 491-496.

56. Жуков, А.И. Методы очистки производственных сточных вод [Текст] / А.И. Жуков, И.Л. Монгайт, И.Д. Родзиллер. – М.: Стройиздат, 1977. – 208 с.

57. Запольских, А.К. Коагулянты и флокулянты в процессах очистки воды [Текст] / А.К. Запольских, А.А. Баран. – Л.: Химия, 1987. – 205 с.

58. Зельдович Я.Б. К теории образования новой фазы. Кавитация [Текст] / Я.Б. Зельдович. – ЖЭТФ. – 1942. – Т. 12. – Вып. (11/12). – С. 525 -538 .

59. Золотухин, И.А. Электрофлотационная очистка шахтных вод Кузбасса [Текст] / И.А. Золотухин, В.А. Васев, А.Л. Лукин // Химия и технология воды. – 1983. – № 3. – С. 252-255.

60. Иванков, С. И. Совершенствование технологии селективно-коллективной флотации комплексных оловянно-полиметаллических руд [Текст] / С.И. Иванков, Л.А. Грекулова // Обогащение комплексных руд цветных и редких металлов; сб. науч. тр. – М.: ВИСМ, 1984. – С.64-68.

61. Ивченко, В.М. Кавитационная технология [Текст] / В.М. Ивченко, В.А. Кулагин, А.Ф. Немчин. – Красноярск: Изд-во КГУ, 1990. – 200 с.

62. Каковский И.А. К теории действия цианидов при флотации // Труды II науч.-техн. сессии инт. Мехнобр. – М., 1952. – С. 110-117.

63. Калинийчук, Е.М. Очистка сточных вод нефтеперерабатывающих заводов от эмульгированных нефтепродуктов электрокоагуляцией и электрофлотацией [Текст] / Е.М. Калинийчук. – М.: ЦНИИТЭНефтехим, 1975. – С. 4-30.

64. Караваев, И.И. Флотационная очистка нефтесодержащих стоков [Текст] / И.И. Караваев, Н.Ф. Резник // Водоснабжение и санитарная техника. –1970. – № 5. – С. 18-21.

65. Карелин, Я.А. Очистка сточных вод нефтеперерабатывающих заводов [Текст] / Я.А. Карелин, И.А. Попов, А.А. Евсеев, О.Я. Евсеева. – М.: Стройиздат, 1982. –184 с.

66. Карпухина, Р.Н. Очистка мазутосодержащих сточных вод [Текст] / Р.Н. Карпухина // Обзоры по межотраслевой тематике. – Сер. VII. – М.: ГОСИНТИ, 1969. – С. 23-32.

67. Классен, В. И. Вопросы теории аэрации и флотации [Текст] / В.И. Классен. – М.: Госхимиздат, 1949. – 350 с.

68. Классен, В.И. Флотация углей [Текст] / В.И. Классен. – М.: Госгортехиздат, 1963. – 412 с.

69. Классен, В.И. Введение в теорию флотации [Текст] / В.И. Классен, В.А. Мокроусов. – М.: Metallurgizdat, 1953. – 463 с.

70. Клименко, Е.Т. Планирование эксперимента [Текст] / Е.Т. Клименко. – М.: 1995. – 34 с.

71. Кнэпп, Р. Кавитация [Текст] / Р. Кнэпп, Д.Ж. Дейлч, Ф. Хэммит. – М.: Мир, 1974. – 688 с.

72. Козин, В.З. Совершенствование технологии обогащения тонковкрапленных сульфидных руд на основе процесса флотоклассификации [Текст] / В.З. Козин, Ю.П. Морозов, Н.В. Базуева // Обогащение тонковкрапленных руд. – Кольский филиал АН СССР, Горный институт. – Апатиты. – 1985. – С. 62-64.

73. Краснов, Г.Д. Основные принципы и практика пневматической пульсационной флотации [Текст] / Г.Д. Краснов, А.А. Лавриненко, Д.В. Крапивный, О.Н. Фролов // Обогащение руд, 1999. – №4. – С. 19-23.

74. Краснов, Г.Д. Основные принципы и практика пневматической пульсационной флотации [Текст] / Г.Д. Краснов, А.А. Лавриненко, Д.В. Крапивный, А.А. Чистяков // Цветные металлы, 2002. – №4. – С. 17-19.

75. Кривчун, А.Н. Электрофлотационный способ очистки транспортно-моечных вод [Текст] / А.Н. Кривчун [и др.] // Сахарная промышленность. – 1975. – № 1. – В. 5. – С. 32-34.

76. Кузькин, С.Ф. Флотация ионов и молекул [Текст] / С.Ф. Кузькин, А.М. Гольман. – М.: Наука, 1971. – 134 с.

77. Кулагин, В.А. Суперкавитация в энергетике и гидротехнике [Текст] / В.А. Кулагин. – Красноярск: Изд-во КГТУ, 2000. – 107 с.

78. Курков, Л.М. Очистка нефтесодержащих сточных вод многокамерной флотацией [Текст] / Л.М. Курков, Д.М. Бриль // Химия и технология воды. – 1990. – Т. 12. – № 10. – 918-921 с.

79. Кязимов, Р.А. Применение реагентов-комплексообразователей при флотации колчеданных полиметаллических руд [Текст] / Р.А. Кязимов, А.З. Ахмедов, Н.Г. Клименко, Н.Д. Ключева // Флотационные реагенты. – М.: Наука, 1986. – С. 81-87.

80. Лейбовский, М.Г. Современное оборудование для флотационной очистки воды [Текст] / М.Г. Лейбовский, Л.Д. Ушаков. – М., 1978. – 71с.

81. Лукиных, Н.А. Применение напорной флотации в очистке сточных вод [Текст] / Н.А. Лукиных, Н.А. Терентьева, Н.А. Залётова // МЖКХ РСФСР Водоснабжение и канализация: Экспресс-информация. – 1976. – №5.

82. Лукиных, Н.А. Флотационное разделение иловых смесей – прогрессивный метод в технологии очистки городских сточных вод [Текст] / Н.А. Лукиных, Б.Л. Липмен, Н.А. Терентьева [и др.] // Санитарная техника

и инженерное оборудование зданий: рефератив. информ. – Сер.9. – М.: ЦИНИС Госстроя СССР, 1977. – Вып. 10.

83. Малиновский, М.А. Флотационные методы обогащения полезных ископаемых [Текст] / М.А. Малиновский. – М.: ВЗПИ, 1960. – С. 15-19.

84. Манцев, А.И. Очистка сточных вод флотацией [Текст] / А.И. Манцев. – Киев: «Будівельник», 1976г. – С.7-8.

85. Матов, Б.М. Флотация в пищевой промышленности [Текст] / Б.М. Матов. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 167 с.

86. Матов, Б.М. Электро-флотационная очистка сточных вод [Текст] / Б.М. Матов. – Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1982. – 170 с.

87. Мацнев, А.И. Особенности очистки высококонцентрированных сточных вод флотацией мелкими газовоздушными пузырьками [Текст] / Гидромелиорация и гидротехническое строительство. Респ. межвед. науч.-техн. сб., 1977. – Вып. 5. – С. 70-72.

88. Мещеряков, Н.Ф. Кондиционирующие и флотационные аппараты и машины [Текст] / Н.Ф. Мещеряков. – М.: Недра, 1990. – 237 с.

89. Мещеряков, Н.Ф. Флотационные машины и аппараты [Текст] / Н.Ф. Мещеряков. – М.: Недра, 1982. – 200 с.

90. Минаева, М.Г. Реагенты применяемые при флотации руд за рубежом [Текст] / М.Г. Минаева, Л.М. Неваева, Т.А. Аккуратова. – М.: Цветметинформация, 1981. – С. 8-14.

91. Митрофанов, С.И. Селективная флотация [Текст] / С.И. Митрофанов. – М.: Недра, – 1967. – 585 с.

92. Мнушкин, И.И. Влияние аполярных реагентов на флотацию зол тепловых электростанций // Обогащение полезных ископаемых [Текст]: респ. межвед. науч.-техн. сб. / И.И. Мнушкин [и др.]. – Киев: Техника, 1988. – Вып. 38. – С. 67-71.

93. Найденко, В.В. Электросатурация при флотационной очистке сточных вод [Текст] / В.В. Найденко, В.И. Алексеев, Л.Н. Губанов // Химия и технология воды. – 1986. – Т. 8. – № 3. – С. 84-85.

94. Никитин, Я.В. Водопотребление, водоотведение и требования к качеству промышленной воды в ЦБП [Текст] / Я.В. Никитин [и др.]; Обзор. – М.: Лесная промышленность, 1977. – С.23-31.

95. Перепелкин, К.Е. Газовые эмульсии [Текст] / К.Е. Перепелкин, В.С. Матвеев. – Л.: Химия, 1979. – 198 с.

96. Перник, А.Р. Проблемы кавитации [Текст] / А.Р. Перник. – Судостроение, 1966. – 435.

97. Петухов, В.Н. Разработка новых реагентных режимов флотации углей / В.Н. Петухов, А.А. Юнаш // Кокс и химия. – 1998. – №3. – С. 5-8.

98. Петухов, В.Н. Флотационная активность химических соединений различного состава и строения при флотации угля / В.Н. Петухов // Кокс и химия. – 1982. – №7. – С. 18-30.

99. Пирсол, И. Кавитация [Текст] /И. Пирсол. – М.: Мир,1975. – 95 с.

100. Плаксин, И.Н. О кинетических уравнениях флотационного процесса [Текст] / И.Н. Плаксин, В.И. Классен, Г.С. Бергер // Цветные металлы. – 1954. – № 4 – С. 20-25.

101. Плаксин, И.Н., Флотация [Текст] / И.Н. Плаксин, В.А. Глембовский. – М.: Госгортехиздат, 1961. –547с.

102. Плаксин, Н.И. Современные направления исследований селективной флотации руд цветных и редких металлов [Текст] / Н.И. Плаксин. – М., 1959. – 21с.

103. Покровский, В.П. Очистка сточных вод тепловых электростанций [Текст] / В.П. Покровский, Е.П. Аракчеев. – М.: Энергия, 1980. –256с.

104. Пономарев, В.Г. Очистка сточных вод нефтеперерабатывающих заводов [Текст] / В.Г. Пономарев, Э.Г. Иоакимис, И.Л. Монгайт. – М.: Химия, 1985. – 256 с.

105. Промтов, М.А. Пульсационные аппараты роторного типа. Теория и практика [Текст] / М.А. Промтов. – М.: Машиностроение, 2001. – 247 с.

106. Ребиндер, П.А. Физико-химия флотационных процессов [Текст] / П.А. Ребиндер. – М.: Metallurgizdat, 1933. – 230 с.

107. Ребиндер, П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия [Текст] / П.А. Ребиндер // сб. избр. тр. – М.: Наука, 1978. – 368 с.

108. Резник Н.Ф. Очистка от нефтепродуктов производственных и балластных вод железнодорожного и морского транспорта методом напорной флотации [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н.Ф. Резник. – М.: НИИЖТ, 1968. – 16 с.

109. Роев, Г.А. Очистка сточных вод и вторичное использование нефтепродуктов [Текст] / Г.А. Роев, В.А. Юфин. – М.: Недра, 1987. – 222 с.

110. Рождественский, В.В. Кавитация [Текст] / В.В. Рождественский. – Л.: Судостроение, 1977. – 248 с.

111. Розенцвайг, А.К. Исследование коалесценции крупнодисперсных концентрированных эмульсий при турбулентном перемешивании [Текст] / А.К. Розенцвайг // Инж. физич. журнал. – 1982. – Т.42. – № 1. – С. 17-22.

112. Рубанштейн, Ю.Б. О математической модели процесса флотации [Текст] / Ю.Б. Рубанштейн, В.И. Тюрникова, Ю.А. Филиппов // Тр. ин-та обогащения твёрдых горюч. ископаемых. – 1974. – Т.4, – Вып. 2. – С. 72-83.
113. Рубинштейн, Ю.Б. Кинетика флотации [Текст] / Ю.Б. Рубинштейн, Ю.А. Филиппов. – М.: Недра, 1980. – 375 с.
114. Рубинштейн, Ю.Б. О направлениях математического моделирования процесса флотации [Текст] / Ю.Б. Рубанштейн, В.И. Тюрникова, Ю.А. Филиппов. – М.: Наука, 1976. – 245 с.
115. Рулев, Н.Н. Теория флотации мелких частиц и флотационной водочистки [Текст]: автореф. дис. ... канд. хим. наук / Н.Н. Рулев. – Киев, 1977. – 23 с.
116. Рулев, Н.Н. Закрепление частицы у поверхности пузырька при флотации и расклинивающее давление смачивающих пленок [Текст] / Н.Н. Рулев, С.С. Духин // Коллоидный журнал, 1983. – Т. 45. – № 6. – С. 1146-1153.
117. Сазерленд, К.С. Принцип флотации [Текст] / К.С. Сазерленд, Е.В. Уорк. – М.: Металлургиздат, 1968. – 680 с.
118. Самыгин, В.Д. Влияние размера пузырьков на флотируемость инерционных частиц [Текст] / В.Д. Самыгин, Б.С. Чертимен, В.П. Небера // Коллоидный журнал. – 1977. – Т. 39. – №6. – С. 1101-1107.
119. Селиванова, Н.В. Новые реагенты для флотации полиметаллических баритсодержащих руд [Текст] / Н.В. Селиванова, А.А. Голиков, Э.П. Тропман // Флотационные реагенты. – М.: Наука. – 1986. – С. 78-81.
120. Сивак, В.М. Аэраторы для очистки природных и сточных вод [Текст] / В.М. Сивак. – Львов.: Вища школа, 1984. – 124 с.
121. Скрылев, Л.Д. О возможности флотационного выделения дисперсной фазы из разбавленных эмульсий типа М/В [Текст] / Л.Д. Скрылев, В.А. Артемова // Коллоидный журнал. – 1974. – Т. 36. – № 3. – С. 594-596.
122. Скрылев, Л.Д. Влияние дисперсности эмульгированных в воде нефтепродуктов на эффективность процесса их флотационного выделения [Текст] / Л.Д. Скрылев, В.К. Ососков, А.М. Почтаренко // Коллоидный журнал. – 1975. – Т. 37. – № 4. – С. 804-806.
123. Смирнов, А. М. Локальная очистка сточных вод целлюлозно-бумажных предприятий методом напорной флотации [Текст]: дис. ... канд. техн. наук 05.21.03 / А.М. Смирнов. – СПб., 2004. – 154 с.
124. Соколов, В.Н. Газожидкостные реакторы [Текст] / В.Н. Соколов, И.В. Доманский. – Л.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
125. Соколов Е.Я. Струйные аппараты [Текст] / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – М.: Энергия, 1979. – 352 с.

126. Сотскова, Т.З. Флотационное разделение фаз эмульсий м/в, стабилизированных анионными ПАВ [Текст] / Т.З. Сотскова, Т.В. Демкиева, Л.Д. Борышкевич // Химия и технология воды, 1998. – № 5. – Т.10. – С. 25-30.

127. Стахов, Е. А. Очистка нефтесодержащих сточных вод предприятий хранения и транспорта нефтепродуктов [Текст] / Е.А. Стахов. – Л.: Недра, 1983. – 263 с.

128. Стахов, Е.А. Руководство по расчету и применению напорных флотационных установок для очистки мазутных сточных вод на объектах минобороны [Текст] / Е.А. Стахов. – М.: ЛВВИСКУ, 1981. – С. 4-9.

129. Стахов, Е.А. Очистка сточных вод ТЭЦ от мазута на вертикальной флотационной установке [Текст] / Е.А. Стахов, В.А. Акульпин, Е.Д. Петрушин // в кн. Водоподготовка, водный режим и химконтроль на порошковых установках. – М.: Энергия, 1978. – Вып. 6.– С.175-180.

130. Сумм, Б. А. Физико-химические основы смачивания и растекания [Текст] / Б.А. Сумм, Ю.В. Горюнов. – М.: Химия, 1976. – 232 с.

131. Тронов, А.В. Исследование процесса турбулентной микрофлотации в слабо концентрированных прямых водонефтяных эмульсиях [Текст] / А.В. Тронов, Д.Б.Хохлов, А.И. Нигматулина // Химия и технология воды, 1991. – Т. 13. – №10. – 887– 893 с.

132. Федоткин, И.М. Использование кавитации в технологических процессах [Текст] / И.М. Федоткин, А.Ф. Немчин. – Киев: Вищи. шк., 1984. – 68 с.

133. Флегентов, И.В. Скорость всплывания газовых пузырьков в жидкости с аномально-вязкими свойствами [Текст] / И.В. Флегентов, Б.И. Дегтерев, Н.Х. Зиннатуллин // Инженерно-физический журнал. – Минск, 1986. – С. 23-40.

134. Фоминых, В.А. Технология очистки воды фильтрованием методом направленного структурообразования осадка [Текст]: автореф. дис... д-ра техн. наук / В.А. Фоминых. – Новосибирск, 2004 – 24 с.

135. Фролов, Ю.Г. Курс коллоидной химии, поверхностные явления и дисперсные системы [Текст] / Ю.Г. Фролов. – М.: Химия, 1988. – 465 с.

136. Фрумкин, А.Н. Физико-химические основы теории флотации [Текст] / А.Н. Фрумкин. – М.: А.Н.СССР, 1932 – С. 8-43.

137. Харитоновский, А.А. Флотация – новый перспективный способ очистки шахтных вод [Текст] / А.А. Харитоновский // Уголь. – 1989. – № 12.– С. 44-46.

138. Худенко Б.М. Аэраторы для очистки сточных вод [Текст] / Б.М. Худенко, Е.А. Шпирт. – М.: Недра, 1987. – 112 с.

139. Чантурия, В.А. Химия поверхностных явлений при флотации [Текст] / В.А. Чантурия, Р.Ш. Шафеев. – М.: Недра, 1977. – 191 с.

140. Чуянов, Г.Г. Оптимизация процесса флотации угольных шламов [Текст] / Г.Г. Чуянов, В.С. Белоусов // Обогащение неметаллических полезных ископаемых: межвуз. науч. тематич. сб. – Свердловск: Изд-во СГИ, 1973. – Вып. 1. – С. 107-112.

141. Шмидт, Л.И. О механизации процесса очистки сточных вод напорной флотацией [Текст] / Л.И. Шмидт // Журнал прикладной химии. – 1970. – № 11. – С. 14-19.

142. Шмидт, Л.И. Исследование процесса очистки сточных вод напорной флотацией [Текст] / Л.И. Шмидт, В.В. Кносетов // Водоснабжение и санитарная техника. – 1972. – № 1. – С.16-18.

143. Шубов, Л.Я. Запатентованные флотационные реагенты [Текст] / Л.Я. Шубов, С.И. Иванков. – М.: Недра, 1992. – 361 с.

144. Эпштейн, Л.А. Возникновение и развитие кавитации [Текст] / Л.А. Эпштейн. – М.: Труды ЦАГИ, 1948. – С. 44-50.

145. Юдилевич, М.М. Определение содержания нефтепродуктов в производственных сточных водах [Текст] / М.М. Юдилевич. – М.: Энергия, 1972. – 51 с.

146. Яковлев С.В., Водоотводящие системы промышленных предприятий: Учеб. для вузов/под ред. С.В. Яковлева [Текст] / С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, Ю.М. Ласков, Ю.В. Воронов. – М.: Строиздат, 1990. – 205 с.

147. Якубовский, Е.П. Опыт эксплуатации флотационной установки [Текст] / Е.П. Якубовский, В.Н. Яромский // Водоснабжение и санитарная техника. – 1989. – №1. – 26 с.

148. Higbie, R. The rate of absorption of a pure gas into a still liquid during short periods of exposure [Text] / R. Higbie // Trans. Am. Inst. Chem. Eng, 1935. – V. 31. – 365 p.

149. Poledne, J. Flotatory a odpadni vody v potravinarstvi [Text] / J. Poledne, D. Kochova // Prumysl potravin. – 1989. – V.40. – N 12. – P.650-653.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ФЛОТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ПРОМЫВНЫХ СТОЧНЫХ ВОД, СОДЕРЖАЩИХ НЕФТЕПРОДУКТЫ.....	6
1.1. Источники образования, состав и свойства промывных сточных вод предприятий машиностроительного профиля, содержащих нефтепродукты	6
1.2. Классификация способов флотационной очистки сточных вод	9
1.3. Флотация с механическим диспергированием воздуха	13
1.3.1. Диспергирование воздуха в воде вращающимся импеллером	13
1.3.2. Гидродинамическое диспергирование воздуха в воде	15
1.4. Флотация с подачей воздуха в воду через пористые материалы ...	18
1.5. Электрофлотация.....	22
1.6. Химическая флотация.....	26
1.7. Флотация с выделением воздуха из пересыщенного раствора	27
Выводы	40
2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФЛОТАЦИОННОГО МЕТОДА ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД, СОДЕРЖАЩИХ НЕФТЕПРОДУКТЫ	42
2.1. Теоретические основы элементарного акта взаимодействия единичной флотируемой частицы с единичным пузырьком воздуха	42
2.2. Теоретические основы процесса образования пузырька воздуха из пересыщенного раствора жидкости	52
2.3. Теоретические основы процесса механического диспергирования водовоздушной смеси	63
Выводы	77
3. ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ВОДОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В РОТОРНО-КАВИТАЦИОННОМ УСТРОЙСТВЕ	78
3.1. Объект исследований, программа и методика проведения исследований процесса диспергирования водовоздушной смеси в роторно-кавитационном устройстве	78
3.1.1. Объект и предмет исследований	78

3.1.2. Описание установки для проведения лабораторных исследований процесса диспергирования водовоздушной смеси в роторно-кавитационном устройстве	79
3.1.3. Программа и методика проведения лабораторных исследований технологии диспергирования водовоздушной смеси в роторно-кавитационном устройстве	82
3.2. Теоретические основы процесса обработки водовоздушной смеси в роторно-кавитационном устройстве	84
3.3. Результаты экспериментальных исследований технологии диспергирования водовоздушной смеси в роторно-кавитационном устройстве.....	89
3.4. Оценка достоверности полученных экспериментальных данных. Разработка математических зависимостей, описывающих процесс диспергирования водовоздушной смеси в роторно-кавитационном устройстве.....	93
Выводы	95
4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ДИСПЕРГИРОВАННОЙ ВОДОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ПОЛЕ ДЕЙСТВИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ И РЕАГЕНТНОЙ ФЛОТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД НА НАПОРНОМ ГИДРОЦИКЛОНЕ	96
4.1. Программа и методика проведения экспериментальных исследований процессов разделения диспергированной водовоздушной смеси в поле действия центробежных сил и реагентной флотационной очистки нефтесодержащих сточных вод на напорном гидроциклоне	96
4.1.1. Описание установки для проведения исследований процесса разделения диспергированной водовоздушной смеси в поле действия центробежных сил	96
4.1.2. Программа и методика проведения экспериментальных исследований процессов разделения диспергированной водовоздушной смеси в поле действия центробежных сил и реагентной флотационной очистки нефтесодержащих сточных вод на напорном гидроциклоне.....	99
4.2. Результаты экспериментальных исследований процесса разделения диспергированной водовоздушной смеси в поле действия центробежных сил.....	101
Выводы	104

5. ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФЛОТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ПРОМЫВОЧНЫХ СТОЧНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОТОРНО-ДИСПЕРГИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА	106
5.1. Производственное внедрение технологии флотационной очистки промывочных сточных вод с использованием роторно-диспергирующего устройства на локальных очистных сооружениях ОАО «Пензтяжпромарматура»	106
5.2. Рекомендации по проектированию и расчету аппаратурного оформления предлагаемой технологии. Расчет экономического эффекта, полученного от внедрения.....	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	116
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	117

Научное издание

Андреев Сергей Юрьевич
Сафронов Максим Александрович
Титов Евгений Александрович

**ФЛОТАЦИОННАЯ ОЧИСТКА НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
РОТОРНО-ДИСПЕРГИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА**

Монография

Редактор М.А. Сухова
Верстка Н.В. Кучина

Подписано в печать 16.11.2017. Формат 60x84/16.
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.
Усл.печ.л. 7,67. Уч.-изд.л. 8,25. Тираж 500 экз. 1-й завод 100 экз.
Заказ № 1075.

Издательство ПГУАС.
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28.