

**СТЕНИН НИКОЛАЙ ЮРЬЕВИЧ**

**РАЗРАБОТКА ФЛОТАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ  
И ПНЕВМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА  
ДЛЯ ОЧИСТКИ ОБОРОТНЫХ И СТОЧНЫХ ВОД**

Специальность 25.00.13 – «Обогащение полезных ископаемых»

**Автореферат**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва – 2009 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Государственный технологический университет «Московский институт стали и сплавов»

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент

Филиппов Лев Одиссеевич

Официальные оппоненты

доктор технических наук, с.н.с

Манцевич Марк Иосифович

кандидат технических наук, в.н.с

Рябов Юрий Васильевич

Ведущая организация

ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт химических технологий»

Защита диссертации состоится « 2 » июня 2009 г. в 16<sup>30</sup> часов в аудитории К-311 на заседании диссертационного совета Д. 212.132.05 при Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Государственный технологический университет «Московский институт стали и сплавов» (МИСиС) по адресу: 119049, г. Москва, Крымский вал, д. 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИСиС.

Автореферат разослан « 30 » апреля 2009 г.

Учёный секретарь диссертационного совета



Т. А. Лобова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы.**

Флотация как основной метод в технологиях обогащения минерального сырья претерпевает в последнее десятилетие значительные изменения в концептуальных подходах как к организации процесса в аппарате, так и к созданию самих аппаратов.

Получившие широкое распространение в обогатительной практике колонные флотомашин, наряду с традиционными механическими и пневмомеханическими машинами, не позволяют радикально повысить управляемость процесса вследствие сохранения принципа протекания в едином объёме аппарата всех субпроцессов, требующих существенно отличающихся гидродинамических условий. Это также ограничивает использование упомянутых конструкций. Например, механические флотомашин применяются практически только для рудной флотации, не получив распространения в области водоочистки вследствие низкого извлечения тонких частиц. Колонные аппараты, напротив, обнаруживают трудности при флотации крупных частиц и сростков.

Горно-обогатительные комплексы относятся к числу наиболее водоёмких отраслей. Также сюда можно причислить гидрометаллургические предприятия, предприятия топливного профиля, текстильное производство, целлюлозно-бумажную промышленность, коммунальное хозяйство. В любой из указанных областей водопотребления образуется значительный объём оборотных и сточных вод, содержащих самые разнообразные примеси (взвешенные шламистые частицы, капли масел, нефтепродуктов, эмульсии и т.п.). Одним из основных звеньев в длинной цепи водоочистки была и остаётся флотация, как весьма производительный и недорогой способ извлечения как тонких взвешенных частиц и органических загрязнений, так и эмульсий масел и красителей. Работа этой ступени очистки определяет эффективность работы всех последующих.

В настоящее время на подавляющем большинстве предприятий в отделениях флотационной очистки эксплуатируются пневматические аппараты для напорной флотации. Это значительные по габаритам сооружения, требующие установки вспомогательного оборудования (высоконапорные циркуляционные насосы, сатураторы). Большинство напорных флотаторов имеют большую площадь зеркала пульпы, что способствует вторичному загрязнению атмосферы вредными летучими веществами. Напорные флотаторы весьма чувствительны к колебаниям производительности по питанию, что ведёт к неустойчивой их работе в случае резких отклонений производительности от номинальной величины. Выход, обводнённость, устойчивость и некоторые другие параметры пенного продукта также не всегда удовлетворяют предъявляемым требованиям.

Одним из основных путей интенсификации процесса флотационной очистки сточных вод является применение пневматических аппаратов для интенсивной

флотации, а именно машин нового поколения из семейства реакторов-сепараторов (РС). Отличительной чертой этих аппаратов является предоставляемая ими возможность независимого управления subprocessами флотации.

Предложено множество запатентованных конструкций реакторов-сепараторов, однако они не свободны от ряда недостатков, снижающих эффективность применения этих аппаратов, в частности, в области водоочистки. Не предложены методологические подходы к разработке и применению этих аппаратов в зависимости от типа и характеристик разделяемых компонентов. Более того, принципы масштабного перехода для проектирования и создания типоразмерного ряда флотомашин не разработаны, а исследования закономерностей флотационного процесса в пневматической машине типа реактор-сепаратор находятся на начальной стадии. В то же время, в связи со всё возрастающим водопотреблением как горно-обогатительных и гидрометаллургических комбинатов, так и предприятий топливного профиля происходит стремительное сокращение водных ресурсов, не подвергшихся промышленному загрязнению.

В силу сказанного разработка аппарата и алгоритма расчёта его конструктивных параметров с целью реализации технологии эффективной флотации тонких частиц и эмульсионных примесей из оборотных и сточных вод является актуальной задачей. При этом интенсификация процесса в разрабатываемом аппарате может быть достигнута как гибким управлением процессами закрепления и отрыва в различных гидродинамических зонах, так и применением новых эффективных реагентов, нормы расхода которых в новом аппарате могут быть существенно снижены за счёт большей вероятности соударения, закрепления частиц на пузырьках и сохранения образовавшихся флотокомплексов.

#### **Цель работы:**

– создание эффективной флотационной технологии очистки оборотных и сточных вод и нового пневматического аппарата типа реактора-сепаратора, позволяющих повысить степень очистки сточных вод и улучшить экологическую обстановку в промышленных зонах и мегаполисах.

#### **Задачи исследования:**

– разработать критерии для оптимизации гидродинамических режимов в многозонных пневматических аппаратах, предназначенных для интенсификации флотации;

– установить зависимости степени очистки при флотации оборотных и сточных вод в реакторе-сепараторе от различных параметров процесса и конструкции флотационного аппарата в широком диапазоне производительности;

– разработать методику расчёта реактора-сепаратора для очистки оборотных и сточных вод на основе выбранных критериев и полученных зависимостей;

– создать экспериментально-опытную установку реактора-сепаратора по разработанной методике и провести испытания на действующем промышленном объекте.

**Методы исследований:** химико-аналитические методы определения концентрации нефтепродуктов и содержания взвешенных веществ; ИК-спектроскопия, фотоколориметрия; нефелометрия; оптическая микроскопия; скоростная видеосъёмка; флотация в реакторах-сепараторах различной производительности. Компьютерная обработка результатов исследований проводилась с использованием пакетов ПО MS Office Excel 2003, Origin Pro 7.5, Adobe Premiere Pro 2.0 и Adobe Photoshop CS.

**Достоверность** полученных результатов работы основывается на использовании большого объёма экспериментальных данных и их статистической обработки, на применении современных аналитических методов и математических моделей.

#### **Научная новизна:**

1. Установлены зависимости степени очистки оборотных и сточных вод различной природы в реакторе-сепараторе от основных параметров флотационного процесса, имеющие в изученных диапазонах экстремальный характер с единственным оптимумом, что позволило вывести эмпирические критериальные уравнения и создать методику расчёта конструктивных и геометрических параметров реактора-сепаратора требуемой производительности.

2. В результате изучения гидродинамических условий в различных зонах реактора-сепаратора разработан принцип сопряжения последовательно расположенных зон в реакторе-сепараторе, заключающийся в согласовании гидродинамических режимов в соседних зонах, что позволяет создавать конструкции реакторов-сепараторов с учётом гидродинамических особенностей процесса, обусловленных типом флотируемого сырья.

#### **Практическая значимость.**

1. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработан новый пневматический флотационный аппарат (реактор-сепаратор МИСиС), использование которого позволяет эффективно извлекать тонкие частицы и эмульсионные примеси из оборотных и сточных вод.

2. На основании критерия подобия приведённых скоростей в характерных гидродинамических зонах реактора-сепаратора создана методика расчёта для проектирования реакторов-сепараторов (РС) требуемой производительности, что позволяет рассчитывать полный модельный ряд реакторов-сепараторов для реализации в промышленных установках.

3. Создана и испытана на ОАО «Московский НПЗ» экспериментально-опытная установка реактора-сепаратора производительностью 10 м<sup>3</sup>/час. Результаты испытаний по извлечению нефтепродуктов и взвешенных веществ из

промышленных сточных вод завода подтвердили показатели, достигнутые в ходе лабораторных исследований.

**На защиту выносятся:**

- установленные зависимости извлечения тонких частиц и эмульсионных примесей из оборотных и сточных вод в новом реакторе-сепараторе;
- разработанные критерии оптимизации гидродинамических режимов в пневматических флотационных аппаратах семейства реакторов-сепараторов;
- конструкция нового пневматического флотационного аппарата типа реактор-сепаратор для флотационной очистки оборотных и сточных вод;
- разработанная технология флотационной водоочистки на основе применения нового реактора-сепаратора и результаты её испытаний.

**Апробация работы.** Результаты исследований, приведённые в настоящей диссертационной работе, докладывались и обсуждались на V Конгрессе обогатителей стран СНГ (Москва, 2005 г.), научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, 2006 и 2008 гг.), на ежегодных выставках «Москва – город науки» (2005-2006 гг.), на ежегодных научных студенческих конференциях МИСиС (Москва, 2003-2005 гг.), на Научно-практической конференции молодых учёных (ВИМС, 2008 г.).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликованы 4 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 3 тезиса докладов в сборниках конференций и подана 1 заявка на патент РФ на изобретение.

**Общая структура диссертации.** Диссертация изложена на 115 страницах и состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованной литературы из 76 наименований, 15 таблиц, 46 рисунков и 4 приложений.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен аналитический обзор литературы, в котором показана роль пневматической флотации в современной промышленности, проведён патентный обзор и дан анализ существующих аппаратов семейства реакторов-сепараторов.

Пневматические флотационные машины (ПФМ) имеют самую простую конструкцию по сравнению с механическими (МФМ) и пневмомеханическими (ПМФМ), так как в них отсутствуют движущиеся части. Широкое применение находят пневматические колонные аппараты, которые имеют ряд преимуществ по отношению к МФМ и ПМФМ.

В развитие теории и решение проблем, связанных с флотацией в пневматических аппаратах, большой вклад внесли В. И. Классен, Н. Ф. Мещеряков, С. И. Митрофанов, Ю. Б. Рубинштейн, Н. Г. Бедрань, С. И. Черных, С. Б. Полонский, G. S. Dobby, G. L. Jameson, G. J. Hartbort, J. A. Finch, R. H. Yoon и многие другие учёные и исследователи.

Анализ литературных источников показал, что теоретические и экспериментальные исследования, конструкторско-технологические изыскания в области создания пневматических флотомашин привели к созданию нового способа и оригинальной последовательности осуществления основных флотационных субпроцессов, реализованных в аппаратах нового поколения типа реактор-сепаратор. Несмотря на промышленное применение этих машин, вопросы их расчёта и закономерности происходящих в них процессов недостаточно полно изучены, освещены в специальной литературе слабо и, в основном, относятся к рудной флотации. Кроме того, промышленные образцы реакторов-сепараторов ведущих фирм-производителей несвободны от недостатков, снижающих эффективность флотационного разделения. При исследовании работы существующих и создании новых конструкций реакторов-сепараторов не была обозначена и не решена проблема сопряжения смежных зон и согласования в них гидродинамических режимов, что вынуждает производителей прибегать к чисто эмпирическому подбору геометрических параметров узлов реактора-сепаратора. Это обуславливает необходимость создания методики и алгоритмов расчёта реактора-сепаратора.

**Во второй главе** дано теоретическое обоснование оптимизации гидродинамических режимов в пневматических флотационных аппаратах и рассмотрены основные принципы их построения.

В реакторе-сепараторе флотация осуществляется последовательно в два этапа: первоначально при оптимальной степени турбулентности происходит закрепление частиц на пузырьках, а затем в камере, в относительно спокойных условиях, минерализованные пузырьки отделяются от пульпы. Процесс аэрирования пульпы и минерализации пузырьков пространственно отделён от процесса расслоения пульпо-воздушной смеси на пену и пульпу. В механических, пневмомеханических и колонных флотомашинах оба процесса происходят одновременно, хотя их оптимальные гидродинамические режимы существенно различаются. Поэтому технологические показатели обогащения (селективность, извлечение) в РС превосходят аналогичные в колонных, механических и пневмомеханических аппаратах.

Для эффективной работы конструкция флотационных аппаратов должна обеспечивать выполнение следующих важных принципов.

1. Ускорение стадии прилипания частиц к пузырьку за счёт создания условий для образования на их поверхности так называемой «газовой шубы» (стадия активации), что было предсказано В. И. Классеном. Активация происходит за счёт выделения на гидрофобной поверхности частиц ранее растворённых газов. Это

делает возможным мгновенный разрыв водной плёнки, а не её вытекание. Время индукции частиц к пузырькам при этом минимально. Особые свойства тонких плёнок между гидрофобными поверхностями обусловлены нуклеацией растворённого газа, который первоначально находился в виде нанопузырей. При нуклеации количество выделенного газа увеличивается с уменьшением расстояния между гидрофобными поверхностями.

2. Повышение скорости всплывания минерализованных мелких пузырьков воздуха в *коалесцентном режиме*, который впервые был предложен В. И. Классеном. Известно, что с уменьшением размеров пузырьков наблюдаются следующие эффекты: при одинаковом расходе воздуха возрастает их число в кубе; увеличивается вероятность соударения и прилипания частиц к пузырькам воздуха; мелкие перегруженные минеральными частицами пузырьки уносятся потоком пульпы в хвосты. При отсутствии коалесценции потоком пульпы, движущимся со скоростью 0,01 м/с, захватываются в хвосты пузырьки диаметром до 0,3-0,4 мм. Уменьшать скорость потока пульпы менее 0,01 м/с экономически не целесообразно. Поэтому в данном случае диаметр пузырьков 0,3-0,4 мм является минимальным. Однако их флотационная активность невысока.

При коалесцентной флотации к мелким пузырькам добавляется часть крупных, так называемых транспортных пузырьков, которые объединяются с мелкими минерализованными пузырьками с образованием аэрофлокул и тем самым не дают им уйти в хвосты. При коалесцентной флотации оптимальный размер мелких пузырьков может быть уменьшен в большей степени, чем при обычной, что приводит к возрастанию не только скорости флотации, но и извлечения.

3. Осуществление каждого субпроцесса флотации в обособленной зоне. Теоретическое обоснование третьего принципа заключается в пространственном разделении процессов, несовместимых по гидродинамическим условиям. Во флотационных машинах происходят три основных процесса: *диспергирования воздуха на пузырьки, минерализации пузырьков частицами и отделения минерализованных пузырьков от пульпы*. Каждый из этих процессов должен осуществляться при оптимальном гидродинамическом режиме движения трёхфазных потоков. Поскольку процессы диспергирования воздуха на пузырьки, процессы закрепления частиц на пузырьках и процессы отделения нагруженных пузырьков в пену от пульпы имеют существенно различные оптимальные условия по степени турбулентности, то их необходимо осуществлять в специальных, пространственно отделённых зонах аппарата.

Существующие реакторы-сепараторы являются единственным типом флотомашин, в которых могут быть выполнены эти три принципа.

Однако анализ конструкций существующих РС показал, что для полной реализации всех трёх принципов необходимо соблюдать условие *оптимального соединения зон*, поскольку оптимальные степени турбулентности, необходимые для проведения процессов диспергации, минерализации и отделения флотокомплексов в пену отличаются в тысячи раз. Из этого следует, что на основные закономерности сложного флотационного процесса оказывает существенное влияние



пространственное разделение зон в аппарате. Таким образом, необходимо обеспечить согласование оптимальных гидродинамических условий в смежных зонах.

Конструкция РС определяется задачей, для решения которой создаётся аппарат, а также типом сырья, поскольку количество и конструкция зон в реакторах-сепараторах, например, для рудной флотации и для водоочистки сильно отличаются. Следствием этого является важное положение о том, что количество зон в аппарате определяется количеством процессов, которыми необходимо управлять для получения максимального эффекта разделения на данном типе сырья. В данной работе для оптимизации конструкции РС для флотационной очистки оборотных и сточных вод в конструкцию аппарата были введены дополнительно зоны флокулообразования и аэрации флокулодержащего потока, а зона для отстаивания пены была увеличена с целью обезвоживания пенного продукта.

С учётом вышеизложенных принципов были созданы лабораторные установки реакторов-сепараторов различного объёма, с помощью которых проведено изучение гидродинамических условий и установление зависимостей при флотационной очистке оборотных и сточных вод.

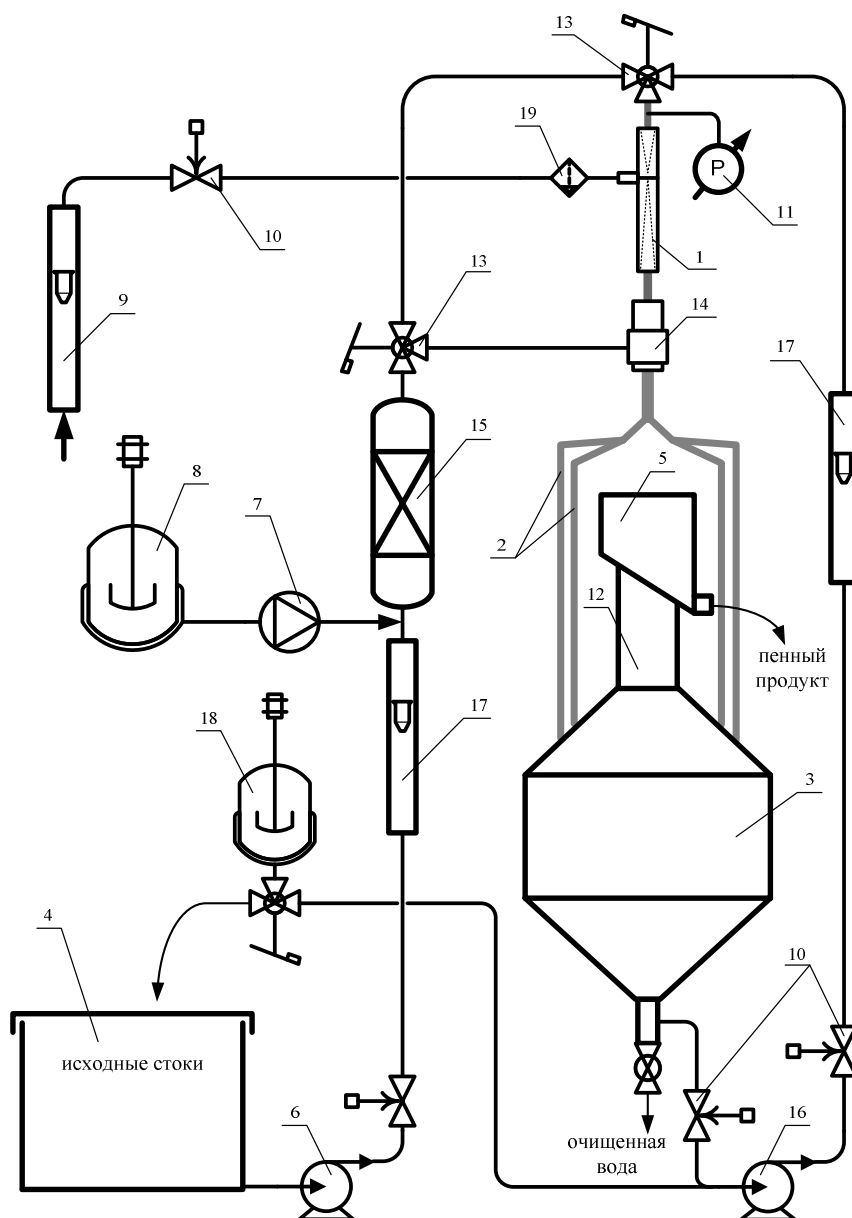
**В третьей главе** описаны материалы и методы исследований, опытные установки реактора-сепаратора и методики проведения экспериментов.

Для установления зависимостей при флотационной очистке сточных вод и разработки критериев масштабного перехода было создано несколько установок реактора-сепаратора. На первом этапе была построена лабораторная модель реактора-сепаратора новой конструкции с объёмом сепаратора 10 дм<sup>3</sup>. Она включала струйно-эжекторный аэратор и два реактора, соединённые с сепаратором. На этой машине были проведены исследования распределений пузырьков по размерам в зависимости от производительности, от расхода воздуха и пенообразователя, а также определены основные гидродинамические и геометрические параметры для создания укрупнённо-лабораторной установки (макета). Определение крупности пузырьков осуществлялось с помощью киносъёмки водовоздушного потока в реакторе. Крупность пузырьков измерялась по 100 кадрам отснятого материала по каждой точке каждого из режимов (порядка 2000 измерений на точку).

Для проведения укрупнённо-лабораторных исследований была создана установка реактора-сепаратора производительностью до 1,7 м<sup>3</sup>/час с изменяемым количеством реакторов при объёме сепаратора 0,09 м<sup>3</sup> согласно схеме, приведённой на рисунке 1. При этом в схему установки были добавлены камера флокулообразования 15 и смеситель 14. Для проведения опытов по флотации углеводородов и взвешенных веществ из сточных вод использовался полимерный флокулянт «Праестол 852 ВС».

Коаксиальный смеситель потоков 14 был разработан и изготовлен для изучения влияния процесса разрушения флокул в центробежном насосе и аэраторе

Флотационные исследования проводились на промышленных сточных водах II системы цеха №16 ОАО «Московский НПЗ», прошедших механическую очистку в отстойных сооружениях завода. Во II систему флотации поступают наиболее загрязнённые стоки предприятия, содержащие большое количество нефтепродуктов (в пике до 20 г/дм<sup>3</sup>), взвешенных веществ (до 15 г/дм<sup>3</sup>), а также сернистые соединения, тиосульфаты, фенол и пр. Уровень pH колеблется в диапазоне 7,5-9,2.



1 – аэратор; 2 – реактор; 3 – сепаратор; 4 – зумпф; 5 – пенный жёлоб; 6 – основной насос; 7 – дозатор флокулянта; 8 – ёмкость с раствором флокулянта; 9 – воздушный расходомер; 10 – задвижка; 11 – манометр; 12 – пеноотстойник; 13 – трёхходовой кран; 14 – смеситель; 15 – камера флокулообразования; 16 – циркуляционный насос; 17 – расходомер пульпы; 18 – ёмкость с пенообразователем; 19 – влагоотделитель

В четвертой главе приведены результаты исследований распределений получаемых воздушных пузырьков по размерам, закономерностей флотационного процесса в реакторе-сепараторе. Приведены результаты исследований стадийности флотации и влияния циркуляционной схемы на эффективность очистки.

На лабораторной установке реактора-сепаратора на чистой воде и на нефтесодержащих сточных водах были исследованы закономерности процесса аэрации и флотационного процесса очистки. Были установлены зависимости степени очистки от времени пребывания в реакторе, скорости пульповоздушного потока в реакторе, расхода воздуха. Исследование процесса дробления пузырьков осуществлялось с помощью струйно-эжекторного аэратора в режиме автоэжекции. Средняя крупность пузырьков при расходе пенообразователя Оксаль (Т-80) 8-11 мг/дм<sup>3</sup> составила 500-900 мкм (рисунок 2).

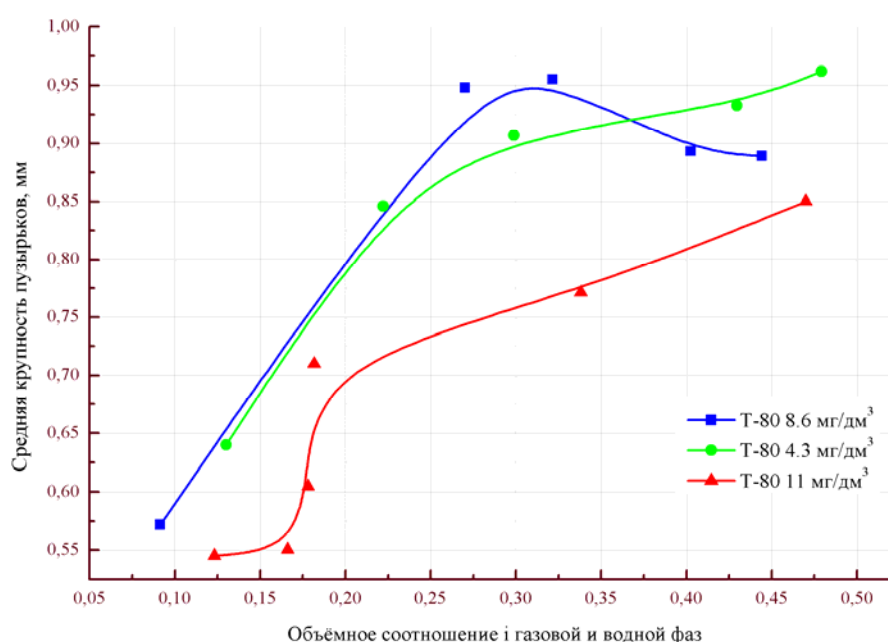


Рисунок 2 – Зависимость среднего диаметра пузырька от объемного соотношения фаз при различном расходе пенообразователя

При расходе пенообразователя 11 мг/дм<sup>3</sup> наблюдается скачкообразное изменение крупности получаемых пузырьков. Объемное соотношение газовой и водной фаз достигает в этом случае 0,18. В точке перегиба резко устанавливается пузырьковый режим движения двухфазного потока в реакторе.

Для эффективной работы реактора-сепаратора определяющими являются длина и сечение реакторов (в которых, собственно, и происходит весь процесс флотации), так как с их помощью осуществляется изменение времени пребывания и скорости потока в реакторе, а значит, и турбулентности этого потока.

Зависимость степени очистки  $E$  от времени пребывания в реакторе  $t_{\text{реакт}}$ , характеризующего продолжительность флотационного взаимодействия пузырьков и частиц, имеет ярко выраженный экстремальный характер в изучаемом диапазоне, и описывается следующей зависимостью, полученной аппроксимацией экспериментальных данных (рисунок 3):

$$E = 34 + \frac{376 \cdot e^{-2 \left( \frac{t_{\text{одддд}} - 2,57}{4,88} \right)^2}}{4,88 \sqrt{\pi/2}}.$$

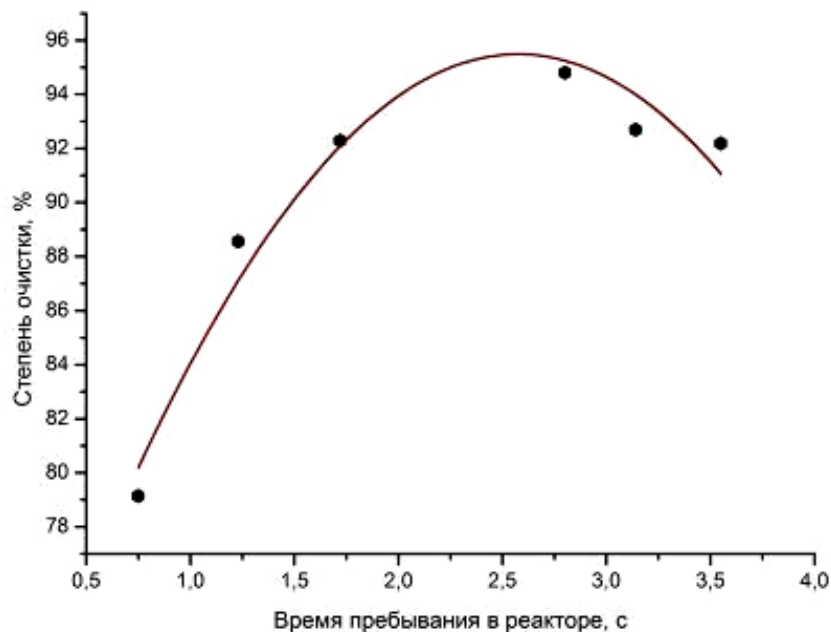


Рисунок 3 – Зависимость степени очистки от времени пребывания в реакторе

Зависимость степени очистки от абсолютной скорости движения пульповоздушной смеси в реакторе имеет оптимум при скорости 1,45 м/с (рисунок 4). Скорость в 1,1 м/с можно считать критической, поскольку при меньшей скорости потока наблюдается интенсивная коалесценция пузырьков в реакторах (возникает пробковый режим). Скорость, превышающая 2 м/с, также неблагоприятно сказывается на процессе флотации, поскольку при этом резко сокращается время пребывания в реакторе (см. рисунок 3).

Влияние расхода воздуха на степень очистки имеет вид, представленный на рисунке 5. Зависимость демонстрирует три характерных зоны: при малом расходе воздуха (менее 0,15 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>) количества пузырьков (и их поверхности) недостаточно для полного извлечения частиц, при чрезмерном расходе воздуха (свыше 0,3 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>) процесс его дробления в аэраторе нарушается, и в реакторах вместо мелких пузырьков начинают появляться воздушные пробки.

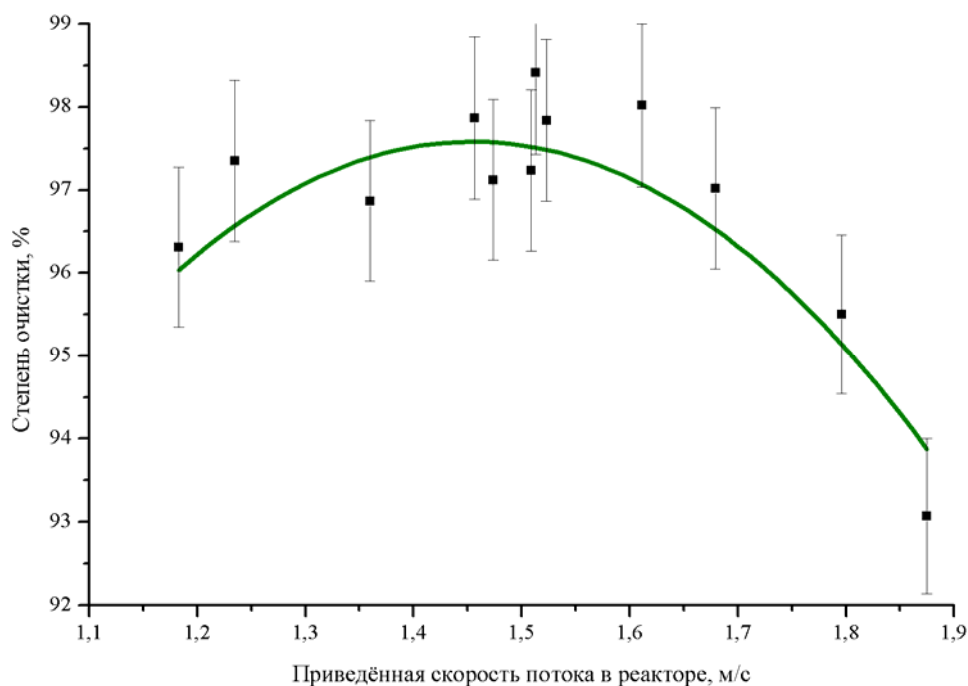


Рисунок 4 – Зависимость степени очистки от скорости потока в реакторе

При оптимуме наблюдается пузырьковый режим, когда в реакторах текут потоки с большим количеством мелких пузырьков в пульпе. Причём, как отмечалось, оптимум возникает скачкообразно и приходится на значение расхода воздуха порядка  $0,16-0,18 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , что согласуется с ранее проведёнными исследованиями процесса дробления воздуха (рисунок 3).

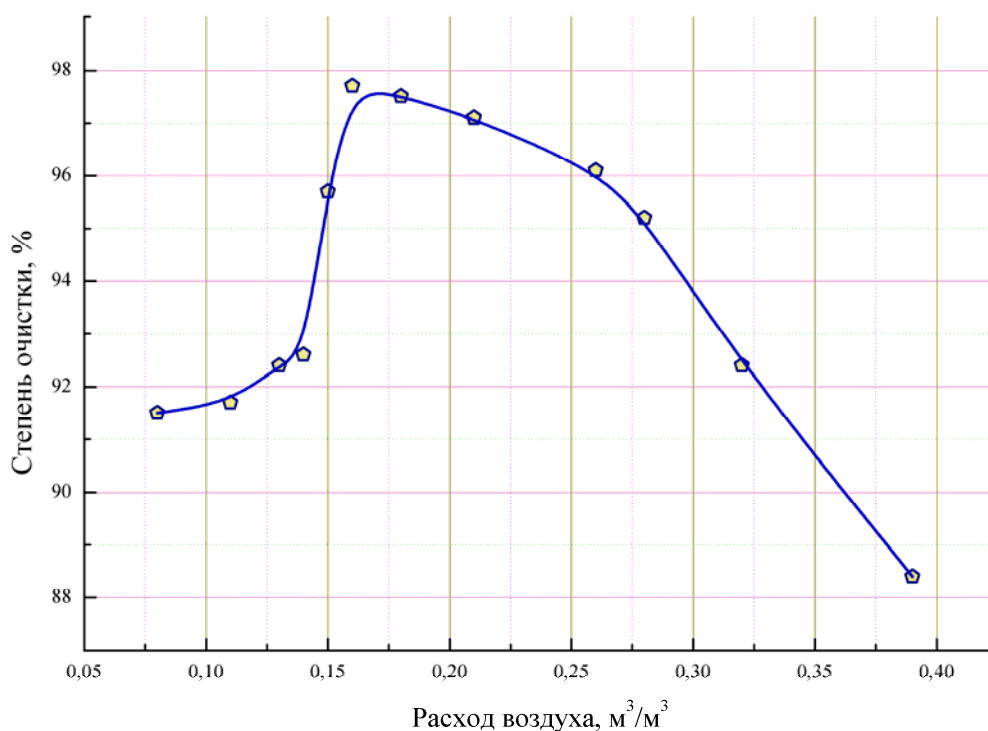


Рисунок 5 – Влияние удельного расхода воздуха на извлечение нефтепродуктов

Проведённые испытания позволили определить гидродинамические режимы (степень турбулентности) в специфических зонах реактора-сепаратора; установить

характер зависимостей степени очистки от основных параметров (расход флокулянта и воздуха, скорость потока в реакторе, продолжительность флотации) и определить оптимальные величины этих параметров при очистке нефтесодержащих сточных вод. При этом установлено фундаментальное отличие полученных для реактора-сепаратора зависимостей, имеющих локальный экстремум, от экспоненциальных характеристик механических и колонных флотомашин.

Предложен новый способ организации процесса циркуляции при флотации сточных вод, согласно которому очищаемая вода, обработанная реагентом и содержащая крупные флоккулы, насыщается пузырьками воздуха без её прохождения через зоны с высокой степенью турбулентности (насос, аэратор). При этом зоны флокулообразования и дробления пузырьков в схеме с циркуляцией пространственно разделены.

Циркуляция очищенной воды в частности имеет место при напорной флотации, а также предусматривается в конструкциях некоторых промышленных образцов реакторов-сепараторов зарубежного производства. При этом схема движения циркуляционного потока не свободна от того недостатка, что очищаемая вода, обработанная реагентом и содержащая флоккулы, проходит через аэратор, где эти флоккулы разрушаются вследствие воздействия турбулентных пульсаций. Предлагаемый способ организации потоков позволяет насыщать обработанный реагентом поток пузырьками воздуха без его прохождения через аэратор. При этом значительно повышается степень очистки. Зоны флокулообразования и дробления пузырьков, таким образом, в схеме с циркуляцией пространственно разделены.

Флоккулы достигают необходимого размера по прошествии определённого промежутка времени, в течение которого происходит кондиционирование сточной воды с флокулянтom (рисунок 6). Вид кривых свидетельствует о том, что в течение первых трёх минут протекает процесс зародышеобразования, и дальнейшая скорость процессов роста и реструктуризации флокул позволяет соотнести эту кинетику с механизмом кластер-кластерной агрегации Жюльена-Микина. На основании этого был сделан вывод о необратимости процесса разрушения флокул в условиях сильной турбулентности. Требуемое время для роста флокул, являющееся максимальным временем кондиционирования пульпы перед флотацией, зависит от природы загрязнителя, типа применяемого флокулянта, интенсивности перемешивания, температуры и т.д.

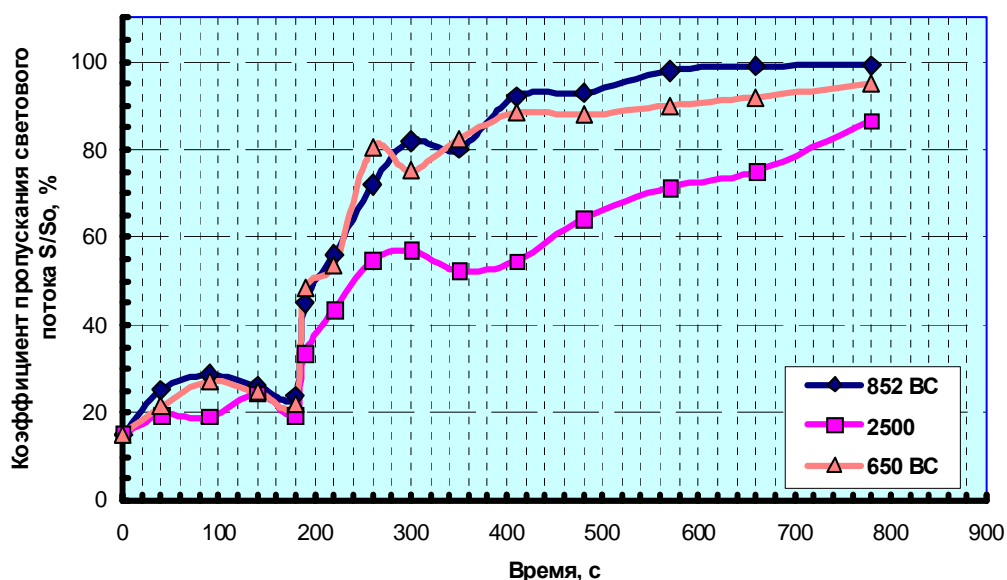


Рисунок 6 – Кинетика осветления сточной воды в присутствии флокулянтов Праестол 852BC, 650BC и 2500

Для организации циркуляционного контура на лабораторной установке реактора-сепаратора был разработан и изготовлен коаксиальный смеситель потоков (14 на рис. 1), который позволял избежать прохождения флокулодержающего потока через насос и аэратор. По циркуляционному контуру сепаратор-насос-аэратор-смеситель направлялась очищенная вода в количестве от 0 до 200% от исходного питания.

Основным параметром циркуляционной схемы является степень циркуляции. Поставленные для изучения влияния циркуляции опыты показали, что наличие циркуляции в целом положительно сказывается на флотационной очистке сточных вод (рисунок 7). Однако оптимальная степень циркуляции находится в узком диапазоне, ограниченном с одной стороны низкой аэрирующей способностью циркуляционного потока, если его объем менее 25-30 % от исходного питания, и падением удельной объемной производительности аппарата – с другой.

Установлено, что качество очистки сточной воды имеет экспоненциальную зависимость от степени циркуляции. Степень циркуляции не должна быть ниже 20-25 %, поскольку в этом случае при смешении водовоздушного и флокулодержающего потоков суммарное газосодержание оказывается недостаточным (всего около 10%).

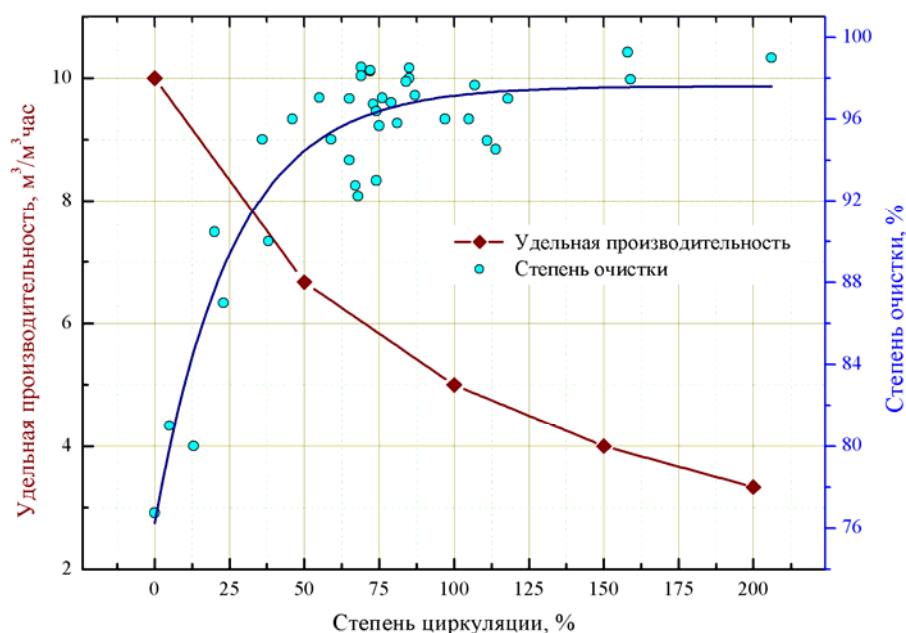


Рисунок 7 – Влияние степени циркуляции на удельную производительность полупромышленной установки и степень очистки от нефтепродуктов

Таким образом, изучение процесса флокуляции и реорганизации потоков с целью предотвращения разрушения флокул позволили оптимизировать конструкцию установки реактора-сепаратора введением нового узла – коаксиального смесителя, – и создать эффективную технологию очистки оборотных и сточных вод. Новый пневматический флотационный аппарат отличается от аналогов наличием шести специфических зон с характерной гидродинамикой; согласованием сопряжённых зон; наличием и конструкцией смесителя.

**В пятой главе** предложены принципы масштабного перехода и дана методика расчёта реакторов-сепараторов различного объёма для водоочистки. Приведено описание проведения технологических испытаний на экспериментально-опытной установке реактора-сепаратора (ЭОУ РС2-10) на промышленном объекте. Осуществлён поиск зависимости степени очистки от состава сточных вод и режимных параметров ЭОУ РС2-10 с помощью множественного корреляционного и регрессионного анализов.

Как было показано на реакторах-сепараторах различной производительности, оптимальное значение приведённой скорости в реакторе не зависит от масштабов аппарата. Усреднённая скорость потока в сепараторе ограничивается скоростью всплывания нагруженных пузырьков воздуха. Поэтому в качестве критериев для масштабного перехода были выбраны идентичность времени пребывания в типовых гидродинамических зонах аппарата и установление в них скорости движения пульпы на заданном уровне. Расчёт параметров реактора-сепаратора требуемой производительности основывается на полученных оптимальных значениях гидродинамических параметров с использованием указанных критериев.

При расчёте учитывается следующее:

- средняя приведённая скорость в реакторе ( $v_p$ ) составляет  $1,45 \pm 0,35$  м/с;



- время пребывания жидкости в сепараторе и реакторе  $t_c$  и  $t_p$  вычисляется по критериальным уравнениям:

$$\frac{t_c}{t_0} = \frac{60}{10 + 2 \cdot \ln \frac{W_n}{W_0}}, \quad \frac{t_p}{t_0} = \frac{3600}{1650 - 45 \cdot \ln \frac{W_p}{W_0}}$$

Эти уравнения выведены на основе типоразмерного ряда для реактора-сепаратора МИСиС, рассчитанного на основании полученных зависимостей и критерия подобия скоростей в характерных гидродинамических зонах.

- критическое соотношение газового и водного потоков в эжекторе составляет 0,18, т. е.

$$W_0 = 1,18 \cdot W_n,$$

где  $W_0$  есть общая производительность по водовоздушному потоку, а  $W_n$  производительность по пульпе. Сам расчёт выполняется в такой последовательности:

- 1) Вычисляется время пребывания в сепараторе

$$\frac{t_c}{t_0} = \frac{60}{10 + 2 \cdot \ln \frac{W_n}{W_0}},$$

- 2) Вычисляется объём сепаратора  $V_c = W_n \cdot t_c$ ;

- 3) Задаётся число реакторов  $n_p$  не менее двух;

- 4) Вычисляется производительность одного реактора

$$W_p = 1,18 \cdot W_n / n_p$$

- 5) Вычисляется время пребывания в реакторе

$$\frac{t_p}{t_0} = \frac{3600}{1650 - 45 \cdot \ln \frac{W_p}{W_0}};$$

- 6) Вычисляется необходимый объём реактора  $V_p = W_p \cdot t_p$ ;

- 7) Вычисляется сечение реактора

$$S_p = W_p / v_p$$

и его диаметр

$$d_p = 2 \sqrt{\frac{4 S_p}{\pi}};$$

если диаметр реактора более 300 мм, следует увеличить число реакторов в расчёте и вернуться к п. 4.

- 8) Вычисляется длина реактора

$$L_p = V_p / S_p.$$

Исходными данными для расчёта служат производительность по пульпе  $W_n$  и приведённая скорость пульповоздушного потока в реакторе  $v_p$ , значение которой не превышает 2 м/с. Для создания в реакторе оптимальных значений скоростей и времени пребывания число реакторов  $n_p$  выбирается не менее двух и таким, чтобы их диаметр не превышал 300 мм, что, как показал анализ литературных данных, обеспечивает наиболее устойчивую работу реакторов.

Используя разработанную автором методику, можно рассчитывать реакторы-сепараторы для схем водоочистки любой требуемой производительности.

Лабораторные испытания разработанной технологии флотационной очистки проводились на макетах реактора-сепаратора с объёмами сепаратора 10 и 90 дм<sup>3</sup>.

С использованием приведённой методики была спроектирована двухстадийная автоматизированная флотационная установка РС2-10 с паспортной производительностью 8-12 м<sup>3</sup>/час (рисунок 8) и снабжённая циркуляционным контуром. Установка смонтирована на территории цеха №16 ОАО «Московский НПЗ». Испытания проводились на производственных сточных водах, поступающих на напорную флотацию после отстойных сооружений.

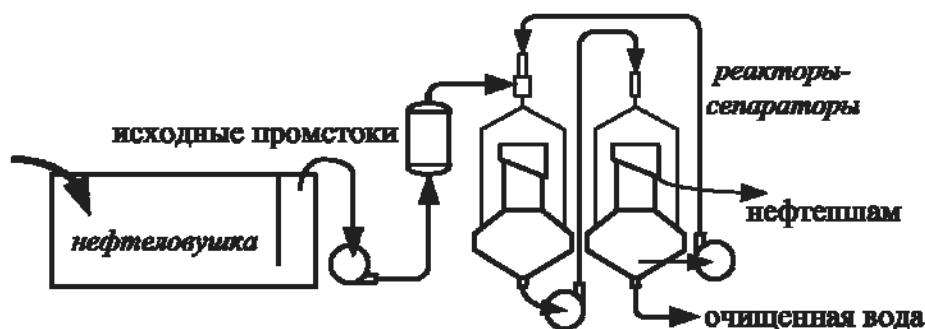


Рисунок 8 – Технологическая схема установки РС2-10

Испытания подтвердили найденные ранее значения оптимальных времени пребывания и приведённых скоростей потоков пульпы в реакторах. На рисунке 9 приведена зависимость извлечения нефтепродуктов от времени пребывания в реакторе, экстремум которого совпадает со значением, полученным на макете РС объёмом 0,09 м<sup>3</sup>.

Испытания флотационной технологии очистки промышленных нефтесодержащих сточных вод проводились как в периодическом (6-часовая смена), так и в непрерывном режиме (72 часа). В ходе испытаний было достигнуто наибольшее снижение остаточной концентрации нефтепродуктов в очищенной воде до 4-6 мг/дм<sup>3</sup> (среднее значение  $19,15 \pm 14,41$  мг/дм<sup>3</sup>) (рисунок 10).

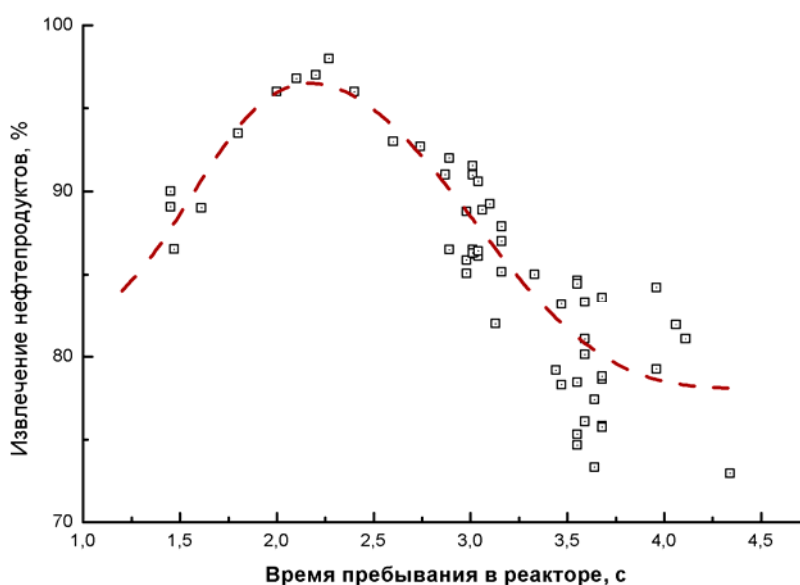


Рисунок 9 – Влияние времени пребывания в реакторе для первой стадии флотации

Таким образом, были проверены правильность принятых для расчёта предпосылок и верность проведённых расчётов. Разработанная технология очистки позволила повысить степень очистки с 83% до 92%, стабилизировать процесс, уменьшить выход пенного продукта до  $0,03 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , снизить расход электроэнергии на 10%.

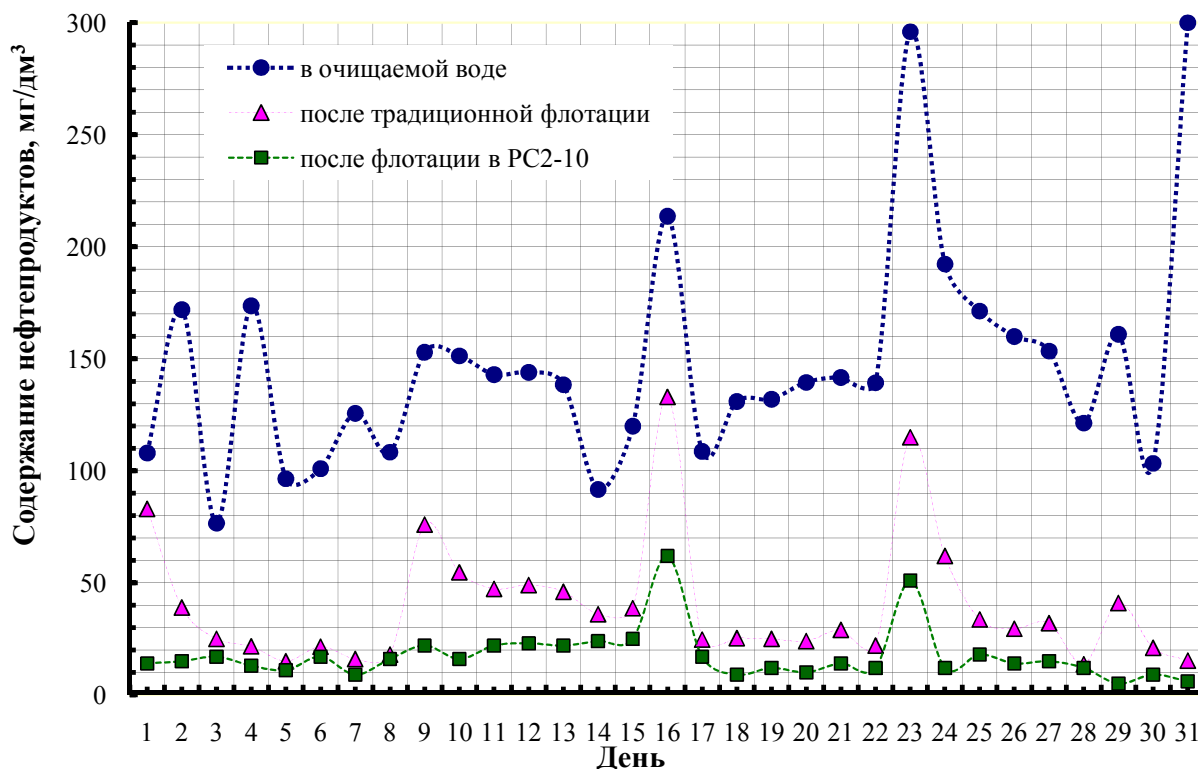


Рисунок 10 – Показатели работы РС2-10 в сравнении с традиционной флотацией в течение месяца

Параметр	для традиционной флотации	для реактора-сепаратора
среднее значение	39,78	19,15
дисперсия	804,9	207,7
стандартное отклонение	28,37	14,41
доверительный интервал ( $p = 0,95$ )	10,41	6,75
отношение дисперсий	3,88	

С помощью метода множественной регрессии были построены модели процесса очистки в РС2-10. С помощью полученных моделей был произведён поиск зависимости степени очистки от pH, расхода флокулянта, расхода воздуха, количества реакторов, времени пребывания в реакторе и сепараторе, давления на аэраторах. Коэффициенты детерминации построенных моделей составили порядка 0,6-0,75.

Согласно модели циркуляционной схемы для увеличения степени очистки при циркуляционной схеме следует уменьшить суммарный расход флокулянта, уменьшить время в реакторе на 1 стадии и увеличить во 2 стадии, увеличить время в сепараторе на 1 стадии и уменьшить во 2 стадии, а такие факторы, как давление на аэраторе, газосодержание, содержание нефтепродуктов и взвешенных частиц

при данной схеме не влияют на степень очистки. При прямоточной схеме для увеличения степени очистки следует уменьшить давление насоса на 1 стадии и увеличить на 2 стадии, увеличить газосодержание на 1 стадии и уменьшить во 2 стадии, уменьшить суммарный расход воздуха, увеличить время в реакторе на 1 стадии и уменьшить во 2 стадии, уменьшить время в сепараторе на 1 стадии и увеличить на 2 стадии. Такие факторы, как суммарный расход флокулянта, содержание нефтепродуктов и взвешенных частиц в очищаемой воде при данной схеме согласно модели не оказывают влияния на степень очистки.

### **Выводы.**

1. Анализ литературных источников показал, что, несмотря на промышленное применение реакторов-сепараторов, не была обозначена и не решалась проблема сопряжения смежных зон и согласования в них гидродинамических режимов; вопросы их расчёта и закономерности происходящих в них процессов недостаточно полно изучены и освещены в специальной литературе слабо, что позволило сформулировать основные принципы создания реакторов-сепараторов, предназначенных для обогащения различного типа сырья.

2. Разработаны критерии оптимизации многозонных аппаратов, позволяющие интенсифицировать процесс флотации за счёт оптимального сопряжения пространственно выделенных зон для гидродинамически несовместимых субпроцессов.

3. Созданы лабораторные и экспериментально-опытные установки реактора-сепаратора различной производительности, позволившие изучить основные закономерности флотационного разделения и разработать критерии масштабного перехода. Показано, что зависимости извлечения углеводородов и взвешенных частиц в пенный продукт от продолжительности флотации, расхода воздуха, концентрации реагента и от скорости двухфазного потока в реакторе имеют в изученном диапазоне экстремальный характер с единственным локальным максимумом.

4. Определены основные геометрические и технологические параметры реактора-сепаратора, необходимые для расчёта и проектирования аппаратов произвольного объёма для флотации тонких и безынерционных частиц. Установлено, что при любой производительности реактора-сепаратора время пребывания в реакторе должно составлять порядка 2 секунд при скорости движения двухфазного потока  $1,45 \pm 0,35$  м/с.

5. В результате проведённых экспериментальных исследований получены критериальные уравнения и разработана методика расчёта реакторов-сепараторов требуемой производительности, с помощью которой по заданной производительности по пульпе могут быть рассчитаны объём сепаратора, число, диаметр и длина реакторов.

6. Показано, что закономерности формирования смешанных агрегатов взвешенных частиц и нефтепродуктов определяют невысокую их устойчивость в

зонах аппарата с высокой степенью турбулентности, что в конечном итоге негативно влияет на результаты флотационной очистки.

7. Установлено, что при флотации тонких частиц и эмульсионных примесей циркуляционная схема флотации обеспечивает более стабильное их извлечение в широком диапазоне времени пребывания пульпы в сепараторе и при значительных колебаниях их содержания в пульпе. Реорганизация потоков с целью предотвращения разрушения флокул за счёт введения нового конструктивного элемента – коаксиального смесителя – позволила оптимизировать конструкцию аппарата и реализовать построение циркуляционной схемы флотации.

8. На основании разработанной методики спроектирована двухстадиальная флотационная установка РС2-10 производительностью 8-12 м<sup>3</sup>/час, заводские испытания которой подтвердили полученные в лабораторных условиях закономерности флотационной очистки. При этом содержание нефтепродуктов в сточной воде было снижено с 80-508 до 7-23 мг/дм<sup>3</sup> (средняя степень очистки 92%) и статистически показано повышение стабильности очистки сточных вод от нефтепродуктов и взвешенных веществ за счёт уменьшения доверительного интервала по содержанию нефтепродуктов в очищенной воде в два раза и уменьшения дисперсии в 3,88 раза.

Основные научные положения и результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в следующих работах:

1. Закономерности флотационной очистки сточных вод от нефтепродуктов и взвешенных веществ в реакторе-сепараторе // V Конгресс обогатителей стран СНГ, т.1, 2005, с. 200-204 // Самыгин В. Д., Филиппов Л. О., Панин В. В. Стенин Н. Ю.
2. Показатели флотационной очистки сточных вод от нефтепродуктов и взвешенных веществ при применении реактора-сепаратора // V Конгресс обогатителей стран СНГ, т.1, 2005, с. 205-207 // Филиппов Л. О., Панин В. В. Стенин Н. Ю., Рогачёв Ю. В.
3. Флотационная очистка сточных вод в реакторе-сепараторе // Экология и промышленность, сентябрь 2005, с. 4-6. // Карабасов Ю. С., Самыгин В. Д., Филиппов Л. О., Панин В. В. Стенин Н. Ю., Воронин Д. Ю.
4. Параметры и режимы эффективной очистки сточных вод с применением флотомашин типа реактор-сепаратор // Цветные металлы, Чёрные металлы, специальный выпуск к 75-летию МИСиС, октябрь 2005, с. 57-63. // Самыгин В. Д., Панин В. В. Филиппов Л. О., Крылова Л. Н., Стенин Н. Ю.
5. Глубокая флотационная очистка нефтесодержащих стоков с применением реактора-сепаратора. // Экология производства. Химия и нефтехимия, №4(6), 2006, с. 11-12. // Панин В. В. Самыгин В. Д., Крылова Л. Н., Стенин Н. Ю.
6. Флотомашин типа реактор-сепаратор для эффективной очистки промстоков от нефтепродуктов и взвешенных веществ // Цветные металлы, № 5, июнь 2007, с. 55-57 // Самыгин В. Д., Филиппов Л. О., Стенин Н. Ю., Мостовской А. Н.
7. Применение новых флотационных пневматических машин типа реактор-сепаратор в обогащении и при очистке сточных вод // Тезисы докладов научно-практической конференции молодых учёных и специалистов, 2008, с. 136-137 // Стенин Н. Ю.