

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Тверской государственный технический университет»

На правах рукописи

ПАШКО Павел Борисович



ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИСПЕРГАТОРА
С МОДУЛЯЦИЕЙ ПОТОКА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ РАБОЧИХ
ЖИДКОСТЕЙ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ КРЕПЕЙ

Специальность 05.05.06 – «Горные машины»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тверь 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тверской государственный технический университет» на кафедре «Гидравлика, теплотехника и гидропривод».

Научный руководитель: **ЯБЛОНЕВ Александр Львович**,
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Гидравлика,
теплотехника и гидропривод» ФГБОУ ВО
«Тверской государственный технический
университет»

Официальные оппоненты: **ТУРУК Юрий Владимирович**,
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры «Проектирование и строительство
автомобильных дорог» Шахтинского
автодорожного института (филиала) ФГБОУ
ВО «Южно-Российский государственный
политехнический университет (НПИ)
им. М.И. Платова»

КРИВЕНКО Александр Евгеньевич,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры «Горное оборудование, транспорт и
машиностроение» Горного института ФГАОУ
ВО «Национальный исследовательский
технологический университет МИСиС»

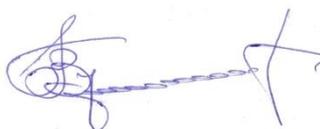
Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный
технический университет имени
Т.Ф. Горбачева»

Защита состоится «29» сентября 2022 г. в 12:00 часов на заседании
Диссертационного совета Д 212.262.07 на базе ФГБОУ ВО «Тверской
государственный технический университет» по адресу: 170026 Тверь, наб.
Афанасия Никитина, д. 22., ауд. Ц-208.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тверской
государственный технический университет» и на сайте вуза по адресу:
<http://www.tstu.tver.ru/science/dissertation/212.262.07>

Автореферат разослан «15» августа 2022 г.

Учёный секретарь
Диссертационного совета



Гультияев Вадим Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. По данным ЦДУ «ТЭК» по состоянию на 01.01.2021 г. добычу угля подземным способом в Российской Федерации осуществляли 58 шахт, при этом 42 шахты работали по технологии «шахта-лава». За последние десять лет средняя нагрузка на лаву выросла в 2,2 раза и составила примерно 4 900 т/сутки. Эффективность добычи угля во многом определяет надежность и ресурс механизированных крепей. При этом механизированная крепь очистного комплекса является уникальной гидросистемой по протяженности и набору используемых элементов, количество которых может достигать нескольких тысяч. Надежность и ресурс элементов любой гидросистемы в основном определяется качеством рабочей жидкости (РЖ), для крепей – это эмульсии. К ним предъявляются специфические требования, отличающиеся от требований к другим РЖ – однородность, тонкодисперсность, сопротивление к коагуляции.

В механизированных крепях первого поколения в качестве РЖ использовалось минеральное масло. Впоследствии стала применяться эмульсия – «масло в воде», в которой использовалось 2–5 % эмульсола и 95–98 % воды. Эмульсол и вода смешивались с использованием специального оборудования. Позже для этих целей начали применяться диспергаторы, использующие ультразвук и кавитацию, позволяющие получать высокодисперсную эмульсию, и, за счет этого, значительно увеличить ресурс элементов механизированной крепи очистных комплексов.

С появлением эмульсолов третьего поколения, растворяющихся в воде при приготовлении эмульсии, использование диспергаторов фактически прекратилось.

В связи с повысившимся риском задержки поставки эмульсола целесообразно иметь диспергатор и запас «обычного», более дешевого отечественного эмульсола в качестве запасного варианта. В настоящее время цена растворимого эмульсола примерно в 5 раз выше, чем применявшихся ранее для диспергирования, и применяющихся сейчас в металлообработке. В случае использования изношенных механизированных крепей на предполагаемом значимом интервале эксплуатации также целесообразно использовать более дешевый эмульсол, в т.ч. по причине его повышенного расхода.

Поэтому обоснование параметров диспергатора с модуляцией потока нового технического уровня (ДМП), позволяющего повысить дисперсность получаемой эмульсии, контролировать и управлять процессом ее приготовления и периодической регенерацией в процессе эксплуатации, т.е. значительно снизить затраты и повысить ее качество, тем самым, повысить эффективность эксплуатации механизированных крепей, является актуальной научной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиям по данной тематике посвящено большое число работ отечественных и зарубежных ученых: Аграната Б.А., Балабышко А.М., Вентцель Е.С., Гаврилова Л.Р., Гетопопова В.И., Зимина А.И., Кандакова Л.А., Карепанова С.К., Ружицкого В.П., Сиротюка М.Г., Снитковского М.М., Хорина В.Н., Юдаева В.Ф., Турука Ю.В., Юрьева В.Н., Кривенко А.Е., Brennen S., Chandrasekhara D.V., Daily Jr., Freidrich T.H., Hammit F., Holl Zh.V., Ivengar K.S., Кнепп R., Neppiras E.A., Richardson E.G., Siamala Rao B.Z. и др.

В то же время, не исследовалась модуляция потока, как инструмент повышения эффективности работы диспергатора и получения более качественных, высокодисперсных эмульсий.

Цель работы. Обоснование параметров диспергатора с модуляцией потока для получения агрегативно устойчивых высокодисперсных рабочих жидкостей механизированных крепей и повышения их работоспособности.

Идея работы. Получение высокодисперсных рабочих жидкостей механизированных крепей за счет использования рационального режима кавитационного воздействия.

Задачи исследования

Для реализации поставленной цели были сформулированы следующие задачи исследования:

- провести анализ состава и свойств РЖ, оборудования для их производства и требований, предъявляемых к ним при получении и регенерации в процессе эксплуатации механизированных крепей;
- выявить зависимость числа кавитации от содержания свободного газа, разработать математическую модель содержания свободного газа;
- разработать методику и алгоритм расчета параметров ДМП;
- разработать экспериментальный стенд для исследования процесса эмульгирования РЖ при различных параметрах ДМП;
- выполнить лабораторные испытания ДМП для производства РЖ; установить соответствие теории зависимости дисперсности эмульсии от обратной величины обобщенного критерия кавитации.

Научная новизна работы

1. Установлена зависимость дисперсности получаемой эмульсии от количества свободного воздуха в обрабатываемой смеси и кавитационного режима в модуляторе.

2. Разработан метод мониторинга содержания свободного газа в процессе получения высококачественной эмульсии и поддержания оптимального режима работы ДМП путем непрерывного регулирования содержания свободного газа в рабочей камере на выходе РЖ из аппарата.

3. Разработан метод расчета ДМП на основе оптимального значения критерия акустической кавитации.

Методы исследования: теоретические, экспериментальные и расчетно-конструктивные, с использованием фундаментальных законов, анализа и статистической обработки полученных результатов измерения.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель концентрации свободного газа, определяющего процесс эмульгирования и диспергирования РЖ гидромеханизированных крепей, учитывающая начальное объемное содержание свободного газа в обрабатываемой среде, радиус пузыря и относительную радиальную скорость пульсирующего пузыря.

2. Зависимость дисперсности получаемой эмульсии от величины предложенного параметра – коэффициента «вводимой плотности мощности», характеризующего «скорость изменения вводимой плотности мощности импульса давления».

3. Зависимость дисперсности получаемой эмульсии от величины обобщенного критерия кавитации.

4. Предложенное выполнение лабиринтного и винтового уплотнения модулятора ДМП, которое позволило увеличить дисперсность получаемой эмульсии на 10–30 % за счет повышения скорости изменения вводимой плотности мощности импульса давления, оцениваемой предложенным коэффициентом «плотности вводимой мощности».

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректностью постановки задач; представленным объемом экспериментальных данных, полученных на разработанном стенде; применением современных методов исследования и прямых средств измерения; корректным применением статистических методов при обработке и анализе экспериментальных данных; удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, расхождение между которыми не превышает 7...8%.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке математической модели процесса эмульгирования и диспергирования РЖ гидромеханизированных крепей, учитывающей влияние давления жидкости в кавитационной области и объемного содержания свободного газа, установлении зависимости дисперсности получаемой эмульсии от величины обобщенного критерия кавитации и от величины предложенного параметра – коэффициента «изменения импульса давления», характеризующего скорость изменения плотности вводимой мощности импульса давления.

Практическая значимость работы

1. Разработана конструкция ДМП для получения тонкодисперсных высококачественных РЖ механизированных комплексов.

2. Разработаны параметры лабиринтного уплотнения на рабочих поверхностях ротора и статора ДМП для получения тонкодисперсных высококачественных РЖ механизированных комплексов.

3. Введены винтовые уплотнения на кольцевых проточках ротора.

4. Разработаны методики расчета минимальной концентрации ПАВ и мониторинга содержания свободного газа в процессе получения высококачественной РЖ, и поддержания оптимального режима работы ДМП путем непрерывного регулирования содержания свободного газа в рабочей камере на выходе РЖ из аппарата.

Реализация работы. Результаты исследований, методика определения параметров, модель и рекомендации приняты организациями, занимающимися разработкой механизированных крепей – ООО «ПИК МАЙНИНГ» и ООО «Объединенные машиностроительные технологии» для дальнейшего использования их в своих проектах.

Личный вклад соискателя состоит в анализе и обобщении результатов ранее выполненных исследований, формулировании цели и задач исследований; разработке конструкции и обосновании параметров ДМП, разработке модели и получении расчетных формул производительности полученной установки, проведении теоретических и экспериментальных исследований, интерпретации их результатов и подготовке публикаций.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: VI Международной научно-технической конференции «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства», Донбасский государственный технический институт, 14–15 октября 2021 г., г. Алчевск, ЛНР; VII Международной научно-практической конференции «Горная и нефтяная электромеханика–2021: повышение эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 19–21 октября 2021 г., г. Пермь; VI Международном инновационном горном симпозиуме, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 19–21 октября 2021 г., г. Кемерово; XV Международной научной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых», Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, 25–28 октября 2021 г., г. Москва; XXX Международном научном симпозиуме «Неделя горняка», НИТУ МИСиС, 1–4 февраля 2022 г. г. Москва.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ, из них 1 – в издании, входящем в наукометрическую базу Scopus, 1 – в рецензируемом издании, рекомендованном ВАК РФ, 8 – в изданиях РИНЦ (6 из них – в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, но не для научной специальности 05.06.06 – Горные машины).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав заключения и 2-х приложений, изложенных на 145 страницах, содержит 32 рисунка, 6 таблиц, список литературы из 123 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Многофакторное воздействие на процессы получения, и регенерации РЖ из-за сложных гидромеханических и кавитационных явлений в роторных гидромеханических диспергаторах (ГМД), наличия свободного газа и недостаточность по этой причине полноты представления о влиянии свободного газа на кавитационное диспергирование затрудняют учет газосодержания при разработке исходных данных для расчета диспергаторов, и, тем более, расчета установки. Все это приводит к необходимости: дальнейшего исследования теоретических основ и экспериментальных закономерностей процессов, протекающих при производстве, регенерации, восстановлении РЖ; совершенствования метода получения эмульсии за счет модуляции потока; расчета диспергаторов, использующих модуляцию потока (ДМП), что позволит в определенных условиях существенно увеличить коэффициент использования горно-шахтного оборудования.

В общей характеристике обоснована актуальность работы, сформулированы цель, задачи, идея, методы исследования, научная новизна, достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, теоретическая и практическая значимость разработок.

В главе 1 представлены обзор источников информации по вопросам функциональных присадок и антифрикционных добавок к смазочным материалам, их классификация по составу и назначению. Приведены существующая классификация и сравнительные характеристики эмульсолов, схемы аппаратов и установок для производства гидравлических РЖ для использования в механизированных крепях. Рассмотрены конструкции типовых диспергаторов. Проведенный обзор по видам кавитации показал, что оптимальный критерий кавитации зависит от обобщенного числа кавитации. Отмечено, что число χ обобщенной кавитации складывается из чисел χ_r – гидродинамической и χ_a – акустической кавитации:

$$\chi^{-1} = \chi_r^{-1} + \chi_a^{-1}. \quad (1)$$

В заключении главы сформулированы выводы по главе, цель и задачи исследования.

В главе 2 рассмотрены основные факторы, влияющие на содержание свободного газа в жидкости, в том числе: статическое давление; температура; общее газосодержание; режим течения жидкости; наличие твердых примесей; космическое и литосферное естественное ионизирующее излучение; ионы, вызывающие отрицательную гидратацию; частота и амплитуда давления жидкости, возбуждаемая ДМП.

Обработка табличных данных по кавитационной прочности воды от ее температуры показала, что она примерно обратно пропорциональна абсолютной температуре в интервале (273÷303) К.

В гидравлических линиях комплексов давление достаточно большое, но в аппаратуре управления вероятность нахождения свободного газа имеет место. Его объем уменьшается обратно пропорционально давлению РЖ. С целью уменьшения свободного газа в РЖ, в камере, после получения РЖ, предусмотрен патрубок с вентилем для удаления свободного газа из РЖ.

На рисунке 1а изображен продольный осевой разрез роторного диспергатора. На рисунке 1б – статор с дополнительными каналами для подачи или отсоса газа из патрубка статора в его боковой стенке. На рисунке 1в изображен модулятор, образованный патрубками подвижного ротора и неподвижного статора, положение дополнительных патрубков относительно его основных патрубков для подачи или отсоса газа из обрабатываемой среды с учетом направления движения стенки ротора относительно патрубка статора.

Роторный диспергатор (рисунок 1) содержит: корпус 1, входной и выходной патрубки аппарата 2 и 3 с регулировочными вентилями 4 и 5, ротор 6 с отверстиями в боковой стенке, который установлен на валу 8. Коаксиально ротору 6 установлен статор 9 с отверстиями 10 в боковой стенке и дополнительными каналами 11, коллектор 12 с вентилем 13, дополнительный входной патрубок 14 с диффузором 15 и вентилем 16. Рабочие поверхности ротора и статора выполнены коническими с конусностью 9 градусов. Величина зазора регулируется пластинками Иогансона между нижним основанием статора и корпусом аппарата в трех эквидистантных точках (на рисунке 1 не показаны).

Аппарат работает следующим образом. Через входной патрубок 2 обрабатываемая жидкая среда – предварительно подготовленная смесь компонентов рабочей жидкости поступает в полость ротора 6, откуда под действием внешнего источника давления, например, насоса, давления центробежных сил вращающейся жидкости в полости ротора 6, вращающегося на валу 8, обрабатываемая жидкость движется через периодически перекрывающиеся патрубки 7 ротора 6 и патрубка 10 статора 9, образуя модулятор аппарата.

В процессе изменения площади проходного сечения потока при движении жидкости из отверстия ротора в патрубок статора, возникают переменные импульсы давления и периодическое сужение площади проходного сечения – эффект трубы Вентури с переменной площадью проходного сечения. Переменные импульсы давления возбуждают импульсную акустическую кавитацию, а труба Вентури – импульсную гидродинамическую кавитацию. В режиме кавитации процесс эмульгирования интенсифицируется наиболее эффективно в кавитационной области, которая развивается в отверстии статора и в камере, образованной внутренней поверхностью корпуса 1 и внешней боковой поверхностью статора 9.

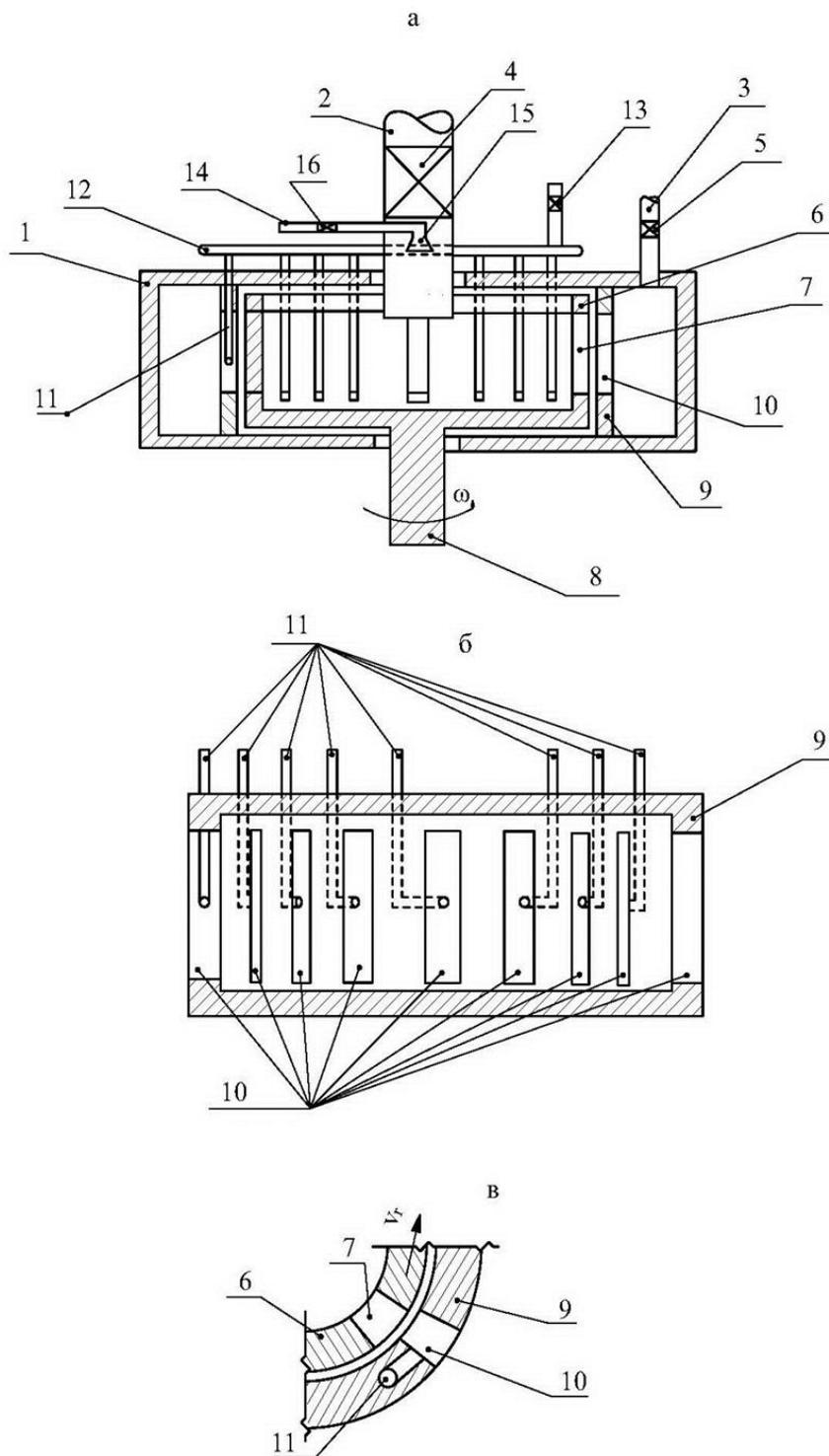


Рисунок 1 – Роторный аппарат типа ДМП с регулируемым содержанием свободного газа в процессе приготовления рабочей жидкости для механизированных крепей: а – продольный осевой разрез диспергатора с модуляцией потока; б – статор с дополнительными каналами для подачи или отсоса газа; в – модулятор, образованный патрубками подвижного ротора и неподвижного статора

Оптимальное кавитационное воздействие на технологический процесс зависит от концентрации свободного газа и его можно изменять при помощи отбора или введения газа вентилями 13 и 16.

Ячеечная математическая модель равномерно распределенных пузырей свободного газа, синхронно колеблющихся, как ансамбль точечных источников звука типа монополь, позволила получить зависимость содержания свободного газа α в газожидкостной среде от радиуса пузырей, из чего следует, что концентрации свободного газа зависит от радиуса пузыря:

$$\alpha = \alpha_0 R^3 [1 - \alpha_0 (1 - R'^3)]^{-1}, \quad (2)$$

где α_0 – начальное объёмное содержание свободного газа в обрабатываемой среде; R – радиус пузыря; R' – относительная радиальная скорость пульсирующего пузыря.

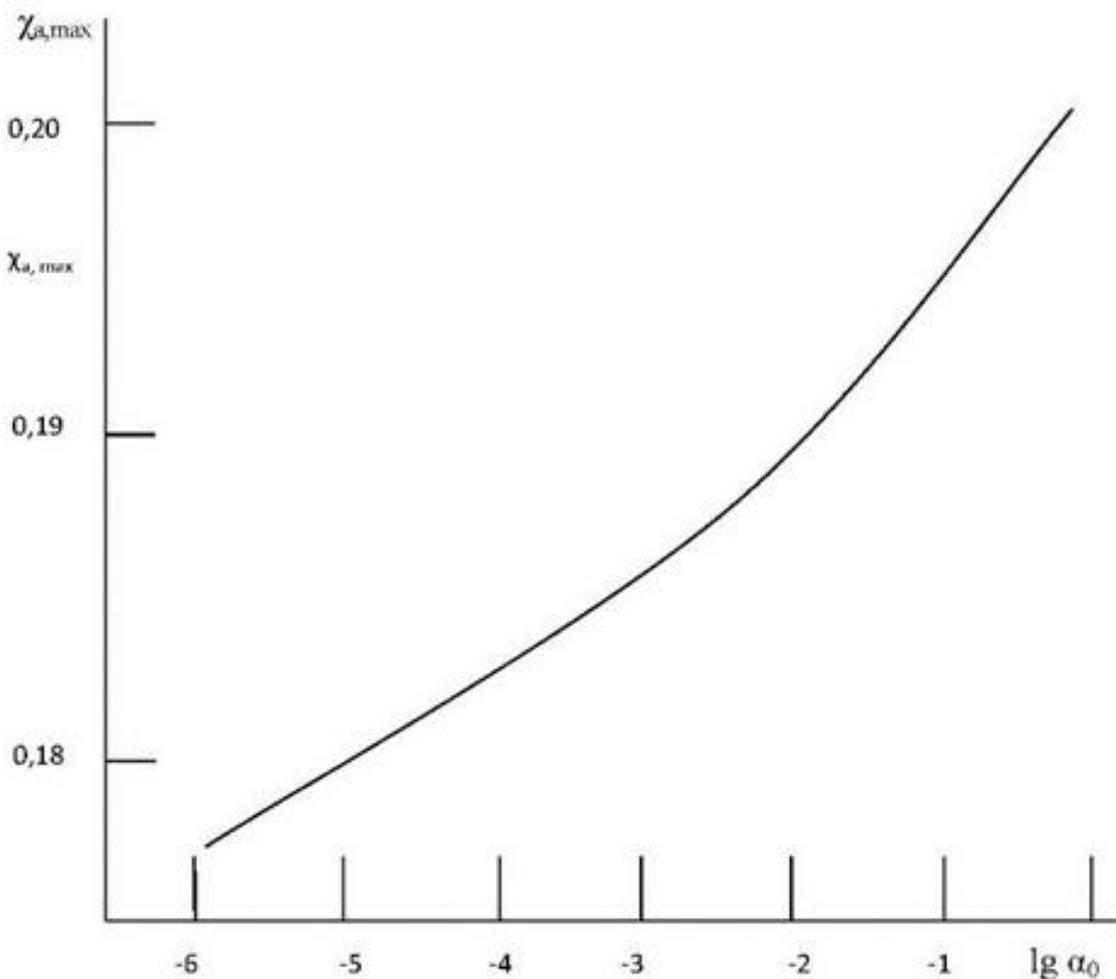


Рисунок 2 – Зависимость оптимального числа акустической кавитации от газосодержания: $R_0=1$; $We = 0,15$; $Re = 10^6$

В работе предложен оригинальный метод непрерывного определения содержания свободного газа α_0 в РЖ, которая находится в камере аппарата-эмульгатора типа ДМП. Оно заключается в том, что α_0 однозначно зависит от отношения модуля амплитуды импульса давления жидкости к статическому давлению и отношению амплитуды первого кавитационного импульса давления ко второму, то есть давлению после первого и второго сжатия кавитационных пузырей. В данном случае все измерения проводятся непрерывно в камере в процессе производства РЖ.

На основании предложенной математической модели динамики пульсирующего пузыря получена зависимость оптимального числа акустической кавитации, когда интенсификация процессов максимальная, от объемного газосодержания жидкости (рисунок 2). Она позволит производить более точные расчеты технологического оборудования, использующего кавитацию в качестве основного фактора для интенсификации химико-технологических процессов.

В главе 3 представлена блок-схема экспериментального стенда (рисунок 3), состоящего из 7 блоков: диспергатора; емкостей с гидроарматурой; линий рециркуляции; нефелометра; блока акустических измерений; тахометра с импульсной лампой; блока измерения температуры. Приведена техническая характеристика ДМП.

Блок I диспергатора состоит из: 1 – диспергатора с входными патрубками 2; патрубков 2_1 и 2_2 возможных двух компонентов дисперсной фазы, которые подают их в центральную трубку-стакан 35 с радиальными отверстиями в ее боковой стенке; манометров на выходе 38 и входе 40 ДМП; вентилях 33 и 39 на выходе ДМП; патрубка 32 для отбора пробы полученной продукции; мерной емкости 32_1 для отбора пробы; электропривода 36; ваттметра 37 для определения мощности привода. Блок емкостей с подачей компонентов II состоит из: емкости 11 для полученной продукции, выходного вентиля 9, насоса 10; емкости для обрабатываемых компонентов РЖ 12, 14, 16, 16_1 ; мешалки 15 с приводом 19; насосов для перекачивания 17 и подачи компонентов в ДМП 18, 20, 21; регулируемых вентилях 22, 23, 24; расходомеров 25, 26, 27. Блок линии рециркуляции III образован: насосом 41, вентилями 42 и 44, расходомером 43. Блок нефелометра IV имеет в своем составе: миллиамперметр 3, источник постоянного тока 4, фотоэлемент 5, кюветы 6, диафрагму оптическую 7, источник света 8. Блок акустических измерений V состоит из: приемника переменного давления 34, импульсных осциллографов марки С1-18 28 и С1-54 29, милливольтметра переменного тока 30. Блок тахометра VI имеет импульсную лампу 31_1 , а блок измерения температуры VII 13 установлен в емкости 14 с мешалкой 15.

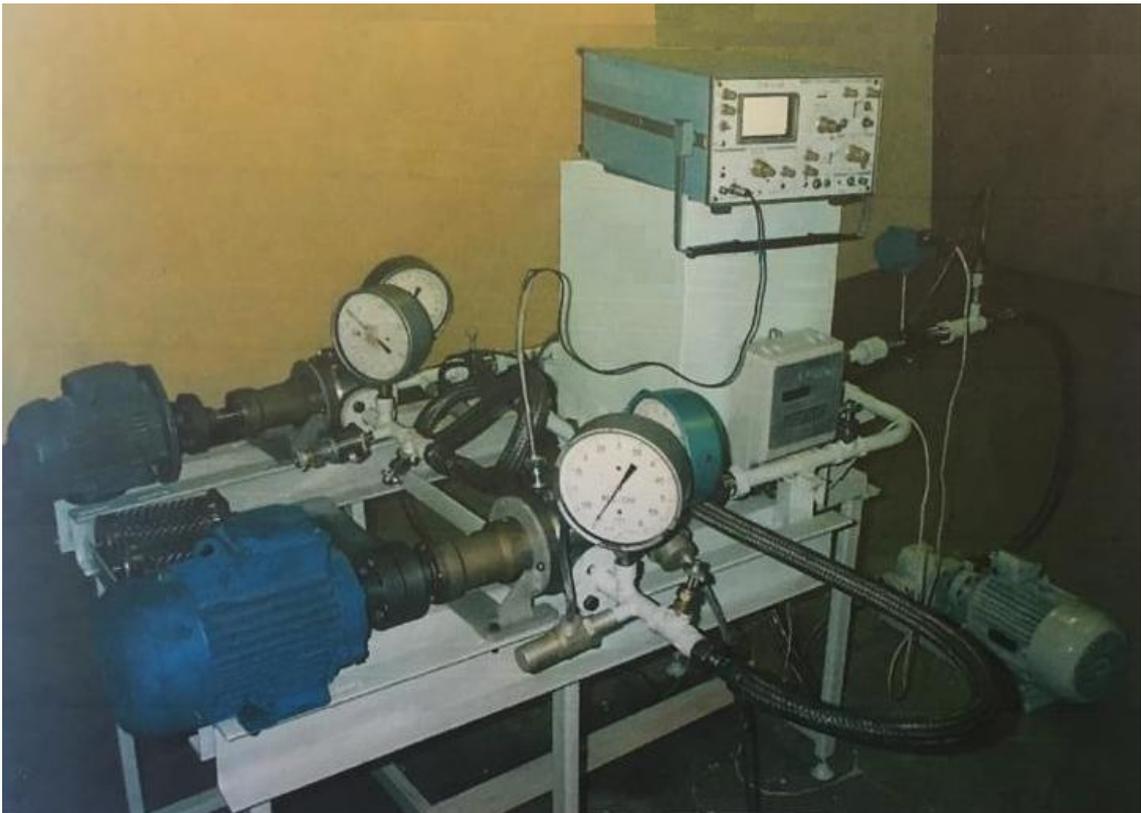
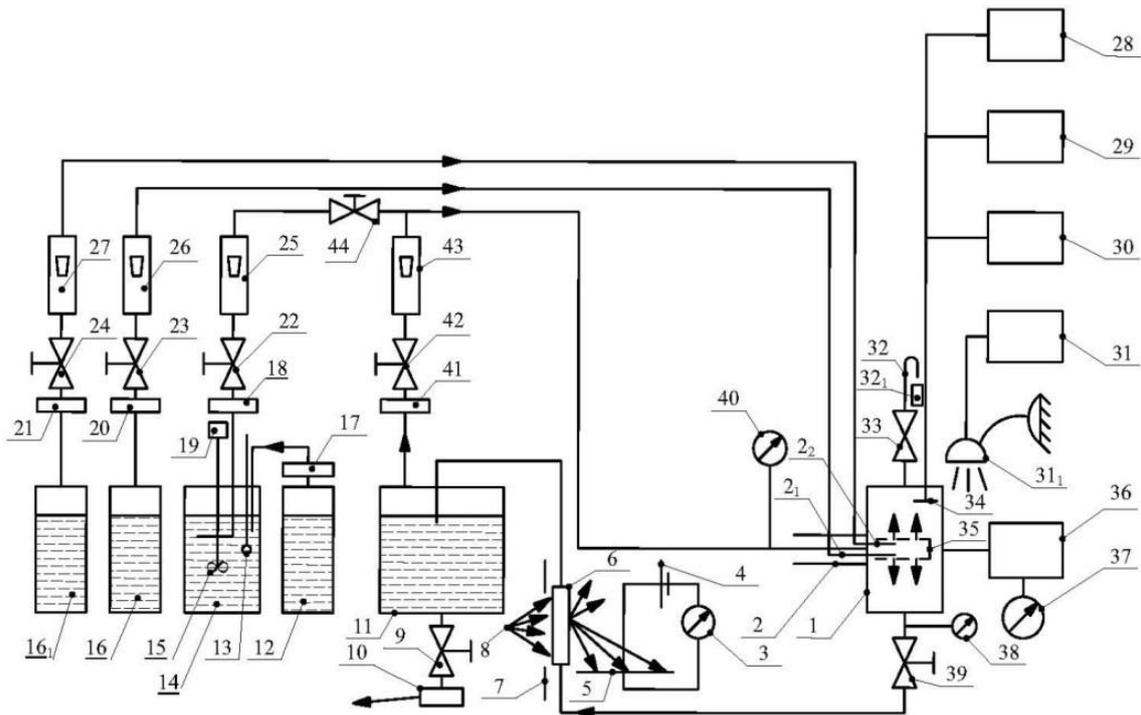


Рисунок 3 – Блок-схема и фотография экспериментального стенда

В работе более подробно рассмотрен метод нефелометрии оптически неоднородных смесей, который применили для определения дисперсности эмульсии и РЖ при известной объемной концентрации масла в воде.

Наиболее полную характеристику гидравлической РЖ можно найти из плотности вероятности распределения капель эмульсии по размеру их диаметров, которая строилась по ее микрофотографиям. Она позволяет найти все характеристики эмульсии. В диссертации приведены микрофотографии, полученные при различных режимах работы ДМП: докавитационном, кавитационном и суперкавитационном. По ним построены плотности вероятности распределения $f(d) = \Delta N / (N \Delta d)$ от диаметра капель.

На рисунке 4 изображены кривые зависимости дисперсности $D_s = d_s^{-1}$ и $D_{ap} = d_{ap}^{-1}$ эмульсии от квадрата расходной скорости в патрубках статора при различных величинах зазора между рабочими поверхностями ротора и статора ДМП.

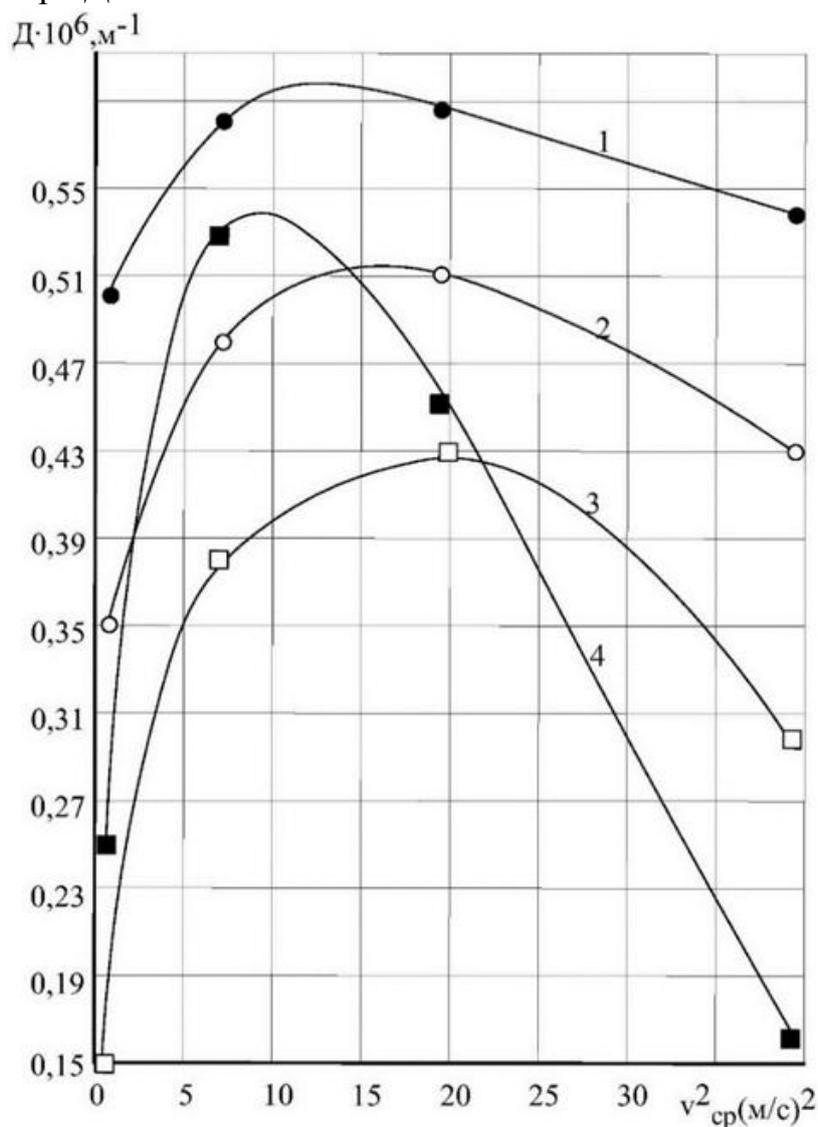


Рисунок 4 – Зависимость D эмульсии (1, 3 – по среднему диаметру; 2, 4 – по средне-поверхностному диаметру) от квадрата расходной скорости в патрубках статора при различных величинах зазора, мм:
1 и 2 – 0,069; 3 и 4 – 0,138

Величина квадрата средней расходной скорости истечения жидкости из отверстий статора $v_{\text{ср}}^2$ обратно пропорциональна значению критерия гидродинамической кавитации χ_r^{-1} и изменялась в экспериментах от 0,775 до 39,7 м²/с². Из зависимостей видно, что кривые имеют максимум, как это и следует из теории акустического воздействия на технологические процессы и из экспериментальных зависимостей интенсивности давления кавитационных импульсов от различных мер влияния на процесс. Среднеарифметическая дисперсность ($12,5 < D_{\text{ср}} < 20$) мкм соответствует кривой 1; при меньшей величине зазора $\delta = 0,069$ мм кривые 1 и 2 расположены в основном выше кривых 3 и 4 ($\delta = 0,38$ мм). Следовательно, чем меньше δ , тем при большем интервале χ^{-1} можно получить высокодисперсную эмульсию, а, соответственно, и качественную РЖ. Скорость модуля изменения дисперсности подчиняются зависимости:

$$\left| \frac{dD}{d\chi^{-1}} \right| = \left| \frac{dD}{dv^2} \right|. \quad (3)$$

На рисунке 5 изображены зависимости среднеарифметической $D_{\text{ср.а}}$ и среднеповерхностной $D_{\text{ср.п.}}$ дисперсностей от обратной величины обобщенного критерия кавитации при различной величине зазора δ .

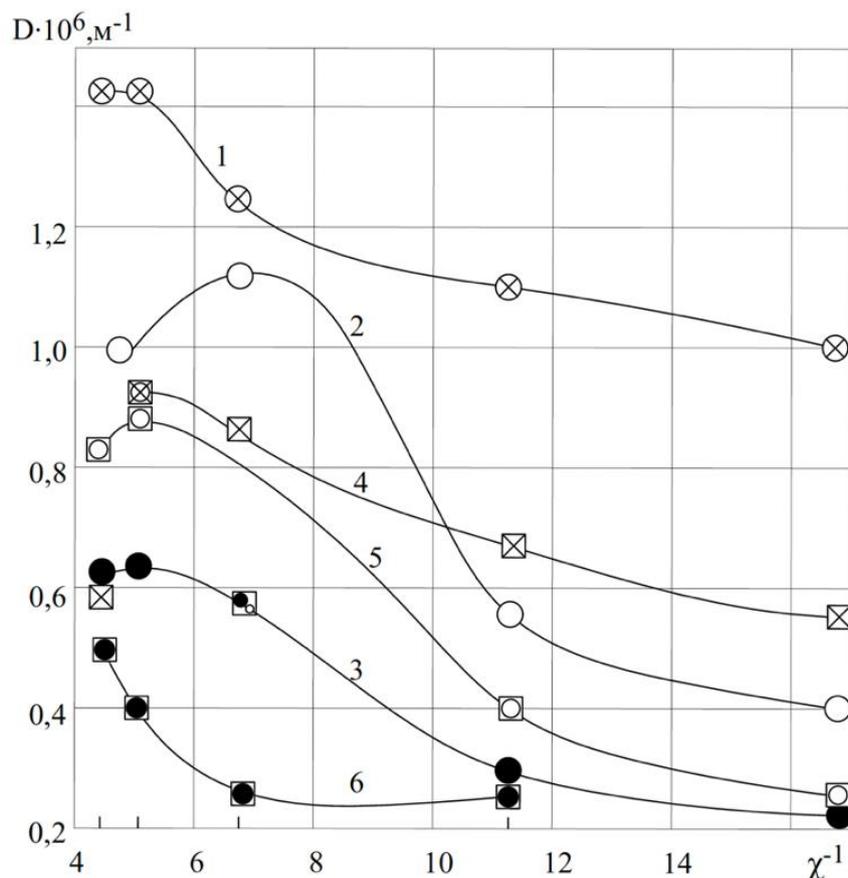


Рисунок 5 – Зависимость среднеарифметической дисперсности распределения капель (1, 2, 3) и среднеповерхностной дисперсности (4, 5, 6) от обратной величины критерия кавитации при различных величинах зазора δ , мм; 1, 2, 3 – 0,069 мм; 4, 5, 6 – 0,207 мм

Из рисунка 5 следует, что кривые 1, 2, 3, 5 имеют максимум в узком интервале величины обобщенного критерия кавитации ($0,147 \leq \chi \leq 0,2$). Кривые 4 и 6 находятся в области величины $\chi < \chi_{\text{опт}}$. В широком интервале изменения χ ($0,23 > \chi > 0,056$) все кривые соответствуют теории оптимального воздействия, в частности, на процесс эмульгирования при широком изменении числа параметров и их интервалов.

Из рисунка 6 следует, что: при небольших величинах зазора между ротором и статором $\delta = 0,069$ мм и $0,138$ мм неоднородность эмульсии прямо пропорциональна обратной величине критерия кавитации; с увеличением δ до $0,207$ мм при меньших значениях χ^{-1} наблюдается зависимость типа кривой насыщения.

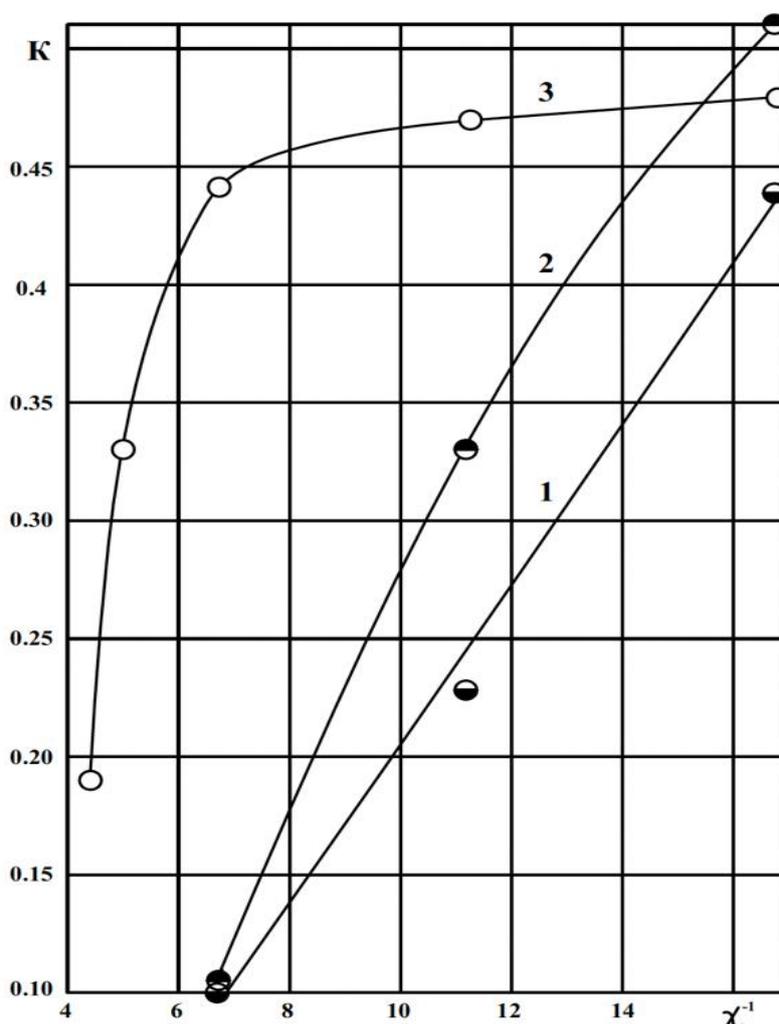


Рисунок 6 – Зависимость однородности эмульсии от обратной величины критерия кавитации при δ , мм: 1 – 0,069; 2 – 0,138; 3 – 0,207

В работе также рассмотрен вопрос о возможном нагревании РЖ в процессе ее производства. Расчет был произведен на основе теплового баланса:

$$\Delta T = \frac{\mu\omega(b_p + a_p)R}{\rho C \delta^2}, \quad (4)$$

где μ – динамический коэффициент вязкости жидкости; ω – угловая скорость вращения ротора; b_p , a_p – ширина промежутка между отверстиями ротора и ширина отверстия ротора, соответственно; ρ – плотность жидкости; C – теплоемкость жидкости; δ – величина зазора между ротором и статором.

Температура жидкости увеличивается прямо пропорционально динамическому коэффициенту вязкости жидкости и обратно пропорционально квадрату величины зазора δ . Например, для воды: $\Delta T = (10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с} \cdot 300 \text{ с}^{-1} \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot 0,07 \text{ м}) / (10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 4,2 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К} \cdot 10^{-8} \text{ м}^2) = 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ К}$, т.е. вода сколько-нибудь не нагревается из-за малого времени пребывания ее в зазоре между ротором и статором, потому изменением температуры в рассмотренных условиях можно пренебречь.

В главе 4 рассмотрены методика расчета и преимущества ДМП перед другими аппаратами-эмульгаторами.

Исходными данными для расчета ДМП являются следующие величины: объемный расход Q компонентов РЖ, объемное содержание свободного газа, частота вращения ротора ω , радиус ротора R_p , состав РЖ (вода, присадки, ПАВ). На основе исходных данных ниже приведена методика расчета ДМП. Отличительной особенностью приведенной методики расчета аппарата типа ДМП является то, что оптимальное значение величины обобщенного критерия кавитации $\chi_{\text{опт}}$ определяется по экспериментально определенному начальному содержанию свободного газа α_0 ($\chi_{\text{опт}} = \chi_{\text{опт}}(\alpha_0)$). До сих пор последнюю зависимость не принимали во внимание при расчете диспергаторов.

1. По экспериментальной зависимости (рисунок 2) определяется оптимальное число акустической кавитации $\chi_{\text{а опт}}$.

2. Плотность рабочей жидкости:

$$\rho_{\text{рж}} = \rho_1 c_1 + \rho_2 c_2 + \rho_3 c_3, \quad (5)$$

где ρ_1 – плотность воды; ρ_2 – плотность эмульсола; ρ_3 – плотность ПАВ; c_i – концентрация соответствующих компонентов РЖ.

3. По формуле Эйнштейна-Смолуховского вычисляется динамический коэффициент вязкости эмульсии:

$$\mu_{\text{рж}} = \mu_c (1 + 2,5c_2), \quad (6)$$

где μ_c – динамический коэффициент вязкости дисперсной среды, т.е. воды, $\mu_c = 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$; c_2 – доля эмульсола в РЖ – $c_2 = 0,02$.

4. Модуль отрицательного максимального отклонения давления от положения равновесия импульса, излучаемого патрубком статора в камеру ДМП, обеспечивающего возбуждение кавитации:

$$|P|_{\text{м}} = \frac{\Delta P}{\chi_{\text{а опт}}}, \quad (7)$$

где $\Delta P = P_{\text{к}} = 0,484 \text{ МПа}$ – давление в камере ДМП.

5. Пользуясь оптимальным значением коэффициента заполнения отверстий в роторе и статоре ДМП ($\tau_p = \tau_c \approx 0,6$) и выражением для его определения, а также, задаваясь оптимальным значением ширины отверстий в статоре и роторе ДМП a вычисляется ширина промежутков между отверстиями (рисунок 7):

$$b = \frac{2a}{\tau_p} - a. \quad (8)$$

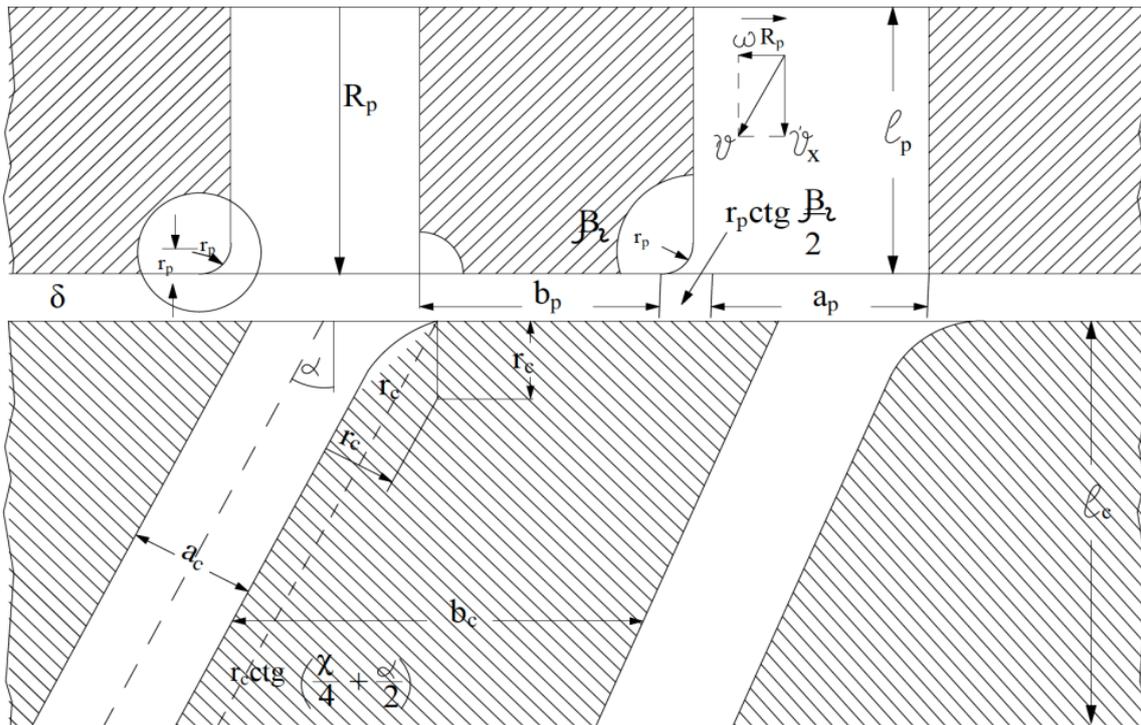


Рисунок 7 – К определению геометрических параметров отверстий патрубков ротора и статора

6. Определяется количество патрубков, расположенных на рабочих поверхностях ротора и статора:

$$Z = \frac{2\pi R_p}{a+b}. \quad (9)$$

7. Уточняется количество патрубков с учетом характеристики делительной головки электроэрозионного станка, после чего, уточняется ширина промежутков между отверстиями в статоре и роторе:

$$b = \frac{2\pi R_p}{Z} - a, \quad (10)$$

и проверяется соответствие оптимальному значению коэффициента заполнения отверстий.

8. Форма поперечного сечения патрубков в роторе и статоре принимается прямоугольной, когда скорость изменения площади проходного сечения диафрагмы ДМП в процессе открывания также является максимальной.

9. С целью увеличения давления жидкости на входе модулятора, предполагается использование нагнетающих лопаток в полости ротора.

10. Определяется высота патрубков по образующей боковой стенки ротора (статора):

$$h = \frac{2l\rho_3\omega R_p\sigma Q}{Za^2|P|_m\tau}, \quad (11)$$

где l – длина модулятора; ρ_3 – плотность эмульсии; ω – частота вращения ротора ДМП; σ – коэффициент поверхностного натяжения,

$$\sigma = \frac{m_\tau}{m_\tau + 2(1-m)}, \quad (12)$$

где $m_\tau \approx 0,552$ – коэффициент модуляции объема; m – коэффициент модуляции объема, зависящий от зазора между ротором и статором δ (принимается равным 0,1 мм) и ширины отверстий a :

$$m = 1 - \frac{\delta}{a}. \quad (13)$$

11. Средний объемный расход за период по поперечному сечению патрубка статора в ДМП-эмульгаторе Q_{1c} при максимально возможном значении критерия гидродинамической кавитации χ_r :

$$Q_{1c} = \frac{Q}{Z}. \quad (14)$$

12. Средняя площадь проходного сечения диафрагмы модулятора:

$$S_{cp} = \frac{ha_c a_p}{a_p + b_p}. \quad (15)$$

13. При известной общей длине модулятора l определяются ее составляющие:

– эффективные длины патрубков модулятора в статоре и роторе:

$$l_{rp} = \sqrt{\frac{ha_c}{\pi}}, \quad (16)$$

– толщина боковых стенок ротора и статора:

$$l_p = l_c = l - 2l_{pn}. \quad (17)$$

14. Дополнительное давление, создаваемое вращающейся в полости ротора жидкостью:

$$\Delta P_{цб} = \frac{1}{2}\omega^2\rho_3(R_p - l_p - l_{pn})^2. \quad (18)$$

15. Давление, создаваемое вращающейся жидкостью в патрубке ротора (внутренний источник давления модулятора, как неоднородного гидравлического участка):

$$\Delta P_{вн} = \frac{1}{2}\rho_3\omega^2\{R_p^2 - [R_p - (l_p - l_{rp})]^2\}. \quad (19)$$

16. Давление жидкости на входе в аппарат:

$$P_{вк} = P_k + \Delta P - \Delta P_{цб} - \Delta P_{вн}. \quad (20)$$

17. Установившаяся скорость течения (скорость Торричелли) идеальной жидкости в патрубках модулятора:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_3}}, \quad (21)$$

18. Проверяется величина модифицированного критерия Рейнольдса:

$$Re_0 = \frac{2v_0\rho_3 a_p h_p}{\mu(a_p+h_p)} > 50 \div 100, \quad (22)$$

где μ – кинематический коэффициент вязкости жидкости.

19. Проверяется величина критерия гомохронности:

$$Ho = \frac{2\omega R_p}{a_c v_0} \approx 4 \div 5. \quad (23)$$

20. Проверяется величина критерия гидродинамической кавитации:

$$\chi_r = P_k / \frac{1}{2} \rho_3 \left[\left(\frac{Q_{1c}}{a_c h} \right)^2 + (\omega R_p)^2 \right] > 1, \quad (24)$$

где P_k – давление жидкости на границе с пузырьком (в камере) без учета внешнего возмущения.

Все рассчитываемые параметры получены с учетом современного уровня знаний о гидромеханических переходных процессах в модуляторе диспергатора.

Наибольший вклад в скорость процесса приготовления эмульсии вносит скорость изменения плотности вводимой мощности импульса давления, которую можно учитывать с использованием коэффициента, который предлагается именовать «коэффициент вводимой плотности мощности» – $K_{впм}$:

$$K_{впм} = \frac{N}{V\Delta t} = \frac{\left| \frac{\Delta P}{\Delta t_1} \right|_{\max} + \left| \frac{\Delta P}{\Delta t_2} \right|_{\max}}{\Delta t_1 + \Delta t_2}, \quad (25)$$

где N – мощность; V – объем; $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$ – длительность импульса давления (точки перегиба кривой $P(t)$ – определяются абсциссами $t = \Delta t_1$ и Δt_2).

Этот импульс возбуждает акустическую кавитацию в обрабатываемой текучей среде – РЖ (рисунок 8).

Расход энергии на нагрев жидкости в зазоре между ротором и статором рассчитывается на основе модели течения жидкости с учетом вязкости.

Полная мощность привода диспергатора равна сумме мощностей на: преодоление сил трения в зазоре (при ламинарной или двухслойной модели течения) нижней и верхней торцевых поверхностей ротора; вращение винтовых лабиринтных уплотнений; преодоление пускового момента сил; холостой ход; сообщение кинетической энергии жидкости; преодоление гидравлического сопротивления.

Предложен метод расчета расстояния между канавками $\Delta_{пр.}$, $\Delta_{пс}$ и числа канавок m_p и m_c лабиринтного уплотнения между отверстиями на рабочих боковых поверхностях, соответственно, ротора и статора (при заданной ширине канавок Δ_k , определяемой режущим инструментом):

$$\Delta_{пр.с.} = (b_{р.с} - m_{р.с} \Delta_{л} / 2) / (m + 1), \quad (26)$$

$$m_{р.с.} = (b_{р.с} - \Delta_{пр.с.}) / \Delta_{л}, \quad (27)$$

где $\Delta_{л}$ – период расположения лабиринтных канавок.

Длина канавок по образующей боковой поверхности ротора и статора должна быть больше высоты h отверстия в роторе и статоре $h + 2(3\div 5) \Delta_r$ при угле заточки резца 60 градусов.

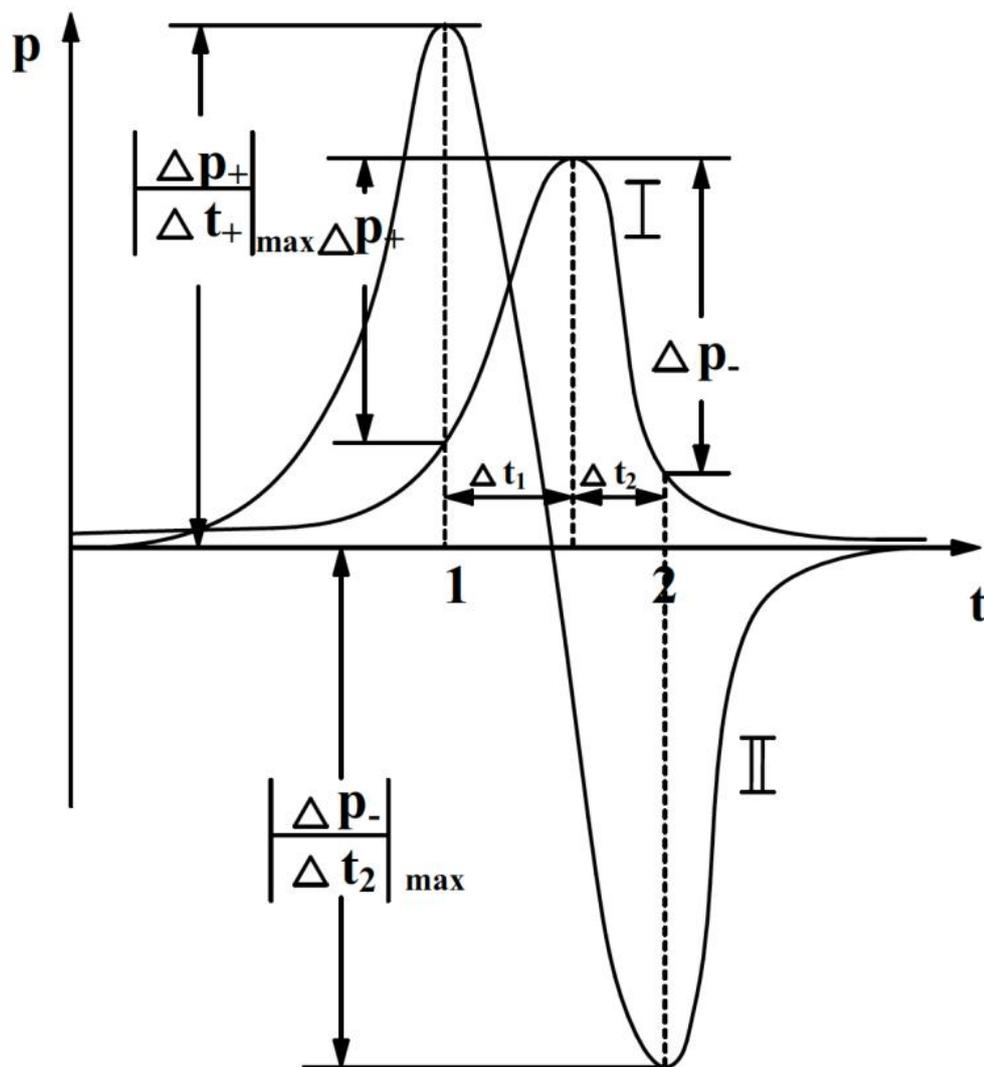


Рисунок 8 – Зависимость давления P (I) и скорости изменения давления dP/dt (II) от времени в обрабатываемой среде при прохождении импульса давления: 1 и 2 – точки перегиба функции $P(t)$; $\Delta t_1, \Delta t_2$ – время нарастания и убывания давления; $\Delta t_1 + \Delta t_2$ – промежуток времени между точками перегиба графика функции $P(t)$

В заключении главы проведен анализ аппаратов-эмульгаторов по их принципу действия. Особое внимание уделено аппаратам с акустическим воздействием на интенсивность процесса и удельным эффективным показателям при их проведении. Показано, что ГМД принципиально выгодно отличается от других, и имеют наименьшие удельные расходы энергии; малую удельная материалоемкость; малую удельная занимаемая площадь аппаратами-эмульгаторами; большие удельные производительности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ, ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертации решена научная задача, имеющая значение для развития знаний в области создания и эксплуатации машин для обеспечения рабочей жидкостью горных механизированных крепей, соответствующая п. 3 паспорта научной специальности 05.05.06 «Горные машины», заключающаяся в обосновании параметров и режимов работы диспергатора с модуляцией потока для повышения качества и уменьшения стоимости получаемой эмульсии механизированных крепей.

Основные выводы и результаты работы.

1. Проведен анализ оборудования для получения эмульсии. Обоснована необходимость использования аппаратов, позволяющих получать незаполненные импульсы давления с амплитудами, достигающими величины 3 МПа и длительностью до 0,2 мс, которые возбуждают кавитационные импульсы давления в обрабатываемой среде до 80 МПа и длительностью до 1 мкс, что необходимо для повышения качества приготовляемой эмульсии.

2. Установлено, что число кавитации, когда интенсивность эмульгирования является максимальной, зависит от содержания свободного газа, что и использовано в качестве исходных данных для усовершенствования методики расчета роторного аппарата-эмульгатора типа ДМП.

3. Разработана ячеечная математическая модель равномерно распределенных пузырей свободного газа, синхронно колеблющихся, как ансамбль точечных источников звука типа монополь.

4. Разработаны методики расчета геометрических, гидравлических, энергетических параметров исследуемого диспергатора с модуляцией потока.

5. Предложен метод расчета числа и геометрических параметров канавок лабиринтного уплотнения между отверстиями на рабочих боковых поверхностях ротора и статора, что позволило увеличить дисперсность получаемой эмульсии на 10–30 % за счет увеличения скорости изменения вводимой плотности мощности импульса давления, оцениваемой предложенным коэффициентом «плотности вводимой мощности».

6. Разработан семиблочный экспериментальный стенд для исследования процесса эмульгирования РЖ при различных параметрах диспергатора с модуляцией потока, на котором получена рабочая жидкость со среднеарифметическим диаметром частиц около 2 мкм при удельном расходе энергии 0,4 кВт·ч/м³, удельной производительности 40 (м³/ч)/м³ и удельной материалоемкости 12 кг/(м³/ч).

7. В процессе приготовления РЖ было установлено что теория влияния меры возбуждения на кавитационный процесс соответствует практической реализации зависимости дисперсности эмульсии от обратной величины обобщенного критерия кавитации.

Основные научные и практические результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

– в изданиях, входящих в наукометрическую базу SCOPUS:

1. **Пашко П.Б.** Обоснование параметров диспергатора для получения и регенерации эмульсии механизированных крепей // Уголь, 2021. № 10. С. 10–13.

– в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

2. **Пашко П.Б.** Яблонев А.Л. Расчет параметров диспергатора для приготовления эмульсии механизированных крепей // Горное оборудование и электромеханика, 2022. № 1. С. 28–35.

– в других изданиях РИНЦ:

3. **Пашко П.Б.**, Юдаев В.Ф., Балабышко А.М. Гидравлические жидкости для гидрофицированных угледобывающих комплексов и их характеристики // Естественные и технические науки, 2019. № 11. С. 345–350.

4. **Пашко П.Б.**, Юдаев В.Ф., Балабышко А.М. Интенсификация производства, регенерации и восстановления рабочей жидкости угледобывающих гидромеханизированных комплексов // Естественные и технические науки, 2019. № 12. С. 267–275.

5. **Пашко П.Б.**, Юдаев В.Ф., Балабышко А.М. Влияние газосодержания на интенсивность кавитации и дисперсность рабочей жидкости гидромеханизированных угледобывающих комплексов // Естественные и технические науки, 2020. № 1. С. 151–156.

6. **Пашко П.Б.**, Юдаев В.Ф., Балабышко А.М. Экспериментальные исследования получения рабочих жидкостей гидромеханизированных угледобывающих комплексов // Естественные и технические науки, 2020. № 1. С. 157–161.

7. **Пашко П.Б.**, Юдаев В.Ф., Балабышко А.М. Лабиринтные и винтовые уплотнения в роторных аппаратах типа гидромеханических диспергаторов // Естественные и технические науки, 2020. № 2. С. 160–165.

8. **Пашко П.Б.**, Юдаев В.Ф., Балабышко А.М. К расчету мощности привода ротора гидромеханического диспергатора // Естественные и технические науки, 2020. № 10. С. 138–142.

9. **Пашко П.Б.** Управление кавитацией в диспергаторах нового технического уровня // В сб. тезисов докладов VI Междун. научно-техн. конф. «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства» 14–15 октября 2021 г. Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР. Алчевск: ДГТИ, 2021. С. 146–148.

10. **Пашко П.Б.** Управление процессом кавитации в диспергаторах нового технического уровня // В сб. «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых». Мат-лы XV Междун. научн. школы молодых ученых и спец. 25–28 октября 2021 г., г. Москва. М.: ИПКОН РАН, 2021. С. 201–203.