

На правах рукописи



ЛАПОНОВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ  
В РОТОРНО-ДИСКОВЫХ СМЕСИТЕЛЯХ  
ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ СМЕШЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД**

Специальность 05.17.08 - "Процессы и аппараты химических технологий"

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Уфа 2019

Работа выполнена на кафедре «Оборудование нефтехимических заводов» филиала ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Стерлитамаке.

Научный руководитель - **Иванов Сергей Петрович**  
доктор технических наук, доцент  
филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г.Стерлитамаке / заведующий кафедрой «Оборудование нефтехимических заводов»

Официальные оппоненты: **Голованчиков Александр Борисович**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»/ профессор кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»

**Бальчугов Алексей Валерьевич**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет» / проректор по научной работе

Ведущая организация - ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (г. Казань)

Защита состоится 15 мая 2019 года в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 212.289.03 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте [www.rusoil.net](http://www.rusoil.net).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Абдульминев Ким Гимадиевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Перемешивание жидкостей является одним из наиболее распространенных процессов различных отраслей промышленности. Часто процесс перемешивания рассматривают как единую систему, в которой перемешивающее оборудование выступает связующим звеном. К смесителям предъявляются жесткие требования, такие как обеспечение непрерывности процесса, максимально возможная простота конструкции, не высокая стоимость, надежность, долговечность, возможность регулирования параметров смеси и многое другое.

Одними из перспективных аппаратов для проведения процесса перемешивания являются малообъемные роторно-дисковые смесители. Их отличительной особенностью является возможность достижения высоких напряжений сдвига и величин деформаций, что обеспечивает высокую поверхность раздела компонентов в смеси. В настоящее время существует большое количество типов малообъемных роторно-дисковых смесителей, отличающихся конструктивным исполнением.

Исследование гидродинамических явлений в роторно-дисковых смесителях и разработка новых конструкций является актуальной проблемой, решение которой невозможно без корректного описания физико-химических явлений, происходящих в аппаратах, и влияния конструктивных особенностей на процесс перемешивания. Особую актуальность приобретает разработка методов расчета роторных смесителей. Это позволит создавать специальные конструкции смесителей для конкретных процессов и сред.

### **Степень разработанности темы**

Разработке конструкций и исследованию гидродинамических явлений посвящены работы М.А. Балабудкина, В.М. Барабаша, Н.С. Шулаева, М.А. Промтова, Е.А. Николаева и др. Труды содержат фундаментальные основы по определению энергетических затрат на проведение процесса перемешивания и эмульгирования в аппаратах роторного типа. В данных работах не представлены

роторно-дисковые смесители с дополнительными элементами, расположенными на поверхностях дисков, а также методика расчета таких аппаратов.

### **Соответствие паспорту специальности**

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют формуле специальности 05.17.08: совершенствованию аппаратного оформления технологических процессов с позиций энерго- и ресурсосбережения на основе использования современных машин и аппаратов.

### **Цели работы**

Разработка новых высокоэффективных конструкций малообъемных роторно-дисковых смесителей (РДС) для диспергирования и перемешивания неоднородных сред. Исследование гидродинамических явлений в роторно-дисковых смесителях и создание методов расчета РДС связывающих свойства среды и геометрические параметры аппарата с энергозатратами необходимыми для создания эмульсии с заданным размером частиц дисперсной фазы.

### **Основные задачи исследования**

1. Разработка новых высокоэффективных конструкций малообъемных роторно-дисковых смесителей для перемешивания неоднородных сред;
2. Разработка методов расчета малообъемных роторно-дисковых смесителей, связывающих свойства среды и геометрические параметры аппарата с энергозатратами, требуемыми для создания эмульсии заданного качества;
3. Разработка и создание экспериментальной установки для исследования гидродинамических явлений в роторно-дисковых смесителях и определения распределения дисперсных частиц по размерам;
4. Проведение экспериментальных исследований с целью изучения энергозатрат при различных режимах работы, адаптированных к требованиям реальных технологических процессов;
5. Сравнение экспериментальных и расчетных данных по энергозатратам и распределению дисперсных частиц по размерам с целью проверки адекватности метода расчета РДС.

### **Научная новизна**

1. Разработаны методы расчета малообъемных роторно-дисковых смесителей, связывающие свойства обрабатываемой среды, геометрические и конструктивные особенности аппаратов с потребляемой мощностью.

2. Впервые для характеристики передачи энергии от рабочих органов РДС обрабатываемой смеси введен параметр, равный отношению площади поверхности перфораций и дополнительных элементов к диаметру диска. Показано, что с увеличением этого параметра диссипация энергии увеличивается.

3. Впервые определена зависимость осредненного размера дисперсных частиц от потребляемой мощности при различных конструктивных параметрах.

4. Экспериментально обоснованы факторы, влияющие на обработку сред в роторно-дисковых смесителях для процессов карбонизации содового раствора и очистки дихлорэтана от побочных продуктов. С точки зрения энергозатрат определены оптимальные режимы обработки.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Разработаны конструкции малообъемного роторно-дискового смесителя (патенты РФ №161841, №174991, №178251, №180435; №183634, №185838). Применение РДС данных конструкций позволит повысить эффективность процессов перемешивания, массообмена и уменьшить энергопотребление.

Применительно к производственным условиям АО БСК г. Стерлитамак по результатам разработки внедрены:

1. Малообъемный роторно-дисковый смеситель в процессе карбонизации содового раствора.

2. Малообъемный роторно-дисковый смеситель в процессе удаления побочных продуктов из дихлорэтана в производстве винилхлорида.

Материалы диссертационной работы используются при чтении курсов лекций по дисциплинам «Процессы и аппараты химических технологий», «Машины и аппараты химических производств», «Механика жидкости и газа» для бакалавров направления 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», профиль «Машины и аппараты химических производств», а также направления 15.03.02

«Технологические машины и оборудование», профиль «Оборудование нефтегазопереработки».

**Достоверность и обоснованность результатов** обеспечивается использованием основных физических закономерностей, поверенных приборов, а так же сходимостью полученных экспериментальных и расчетных данных, погрешность не превышает 10%.

### **Методология и методы исследования**

В работе использованы следующие методы исследования: анализ, аналогия, сравнение, моделирование, наблюдение, обобщение и системный метод.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Конструкции малообъемного роторно-дискового смесителя, позволяющие интенсифицировать процессы перемешивания и массообмена.
2. Результаты экспериментальных исследований гидродинамических явлений в роторно-дисковых смесителях.
3. Методы расчета малообъемных роторно-дисковых смесителей, связывающих свойства среды и геометрических параметров аппарата с энергозатратами требуемыми для создания эмульсии заданного качества.

### **Апробация работы**

Результаты работы представлены в материалах международных конференций «Нефть и газ» г. Москва, 2016, 2017г., «Актуальные проблемы науки и техники - 2016» г. Уфа, 2016г., «Современные тенденции подготовки кадров для нефтегазовой отрасли» г.Атырау, 2018г., «Развитие современной науки: тенденции, проблемы, перспективы» г.София, 2018г., «Современная наука: Проблемы и перспективы» г.Душанбе, 2018г., «Современные тенденции в науке и образовании» г.Астана, 2018г., «Современные технологии в нефтегазовом деле-2018» г.Уфа, 2018г., внутривузовской научно-практической конференции «Образование и наука в современных условиях» г. Стерлитамак, 2016г., всероссийской научно-технической конференции международным участием г. Ярославль, 2016г.

## **Публикации**

Основное содержание работы изложено в 23 публикациях, 6 из них - патенты РФ на полезную модель, 5 - статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья в журнале, входящем в базу данных Scopus.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, основных выводов, списка использованных источников и приложений. Объем диссертации составляет 109 страниц, содержит 57 рисунков, 5 таблиц.

## **Благодарности**

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю д.т.н. заведующему кафедрой «Оборудование нефтехимических заводов» С.П. Иванову за помощь на всех этапах работы, д.т.н. профессору кафедры «Информатика, математика и физика» Н.С. Шулаеву за научные консультации и помощь в проведении экспериментальных исследований.

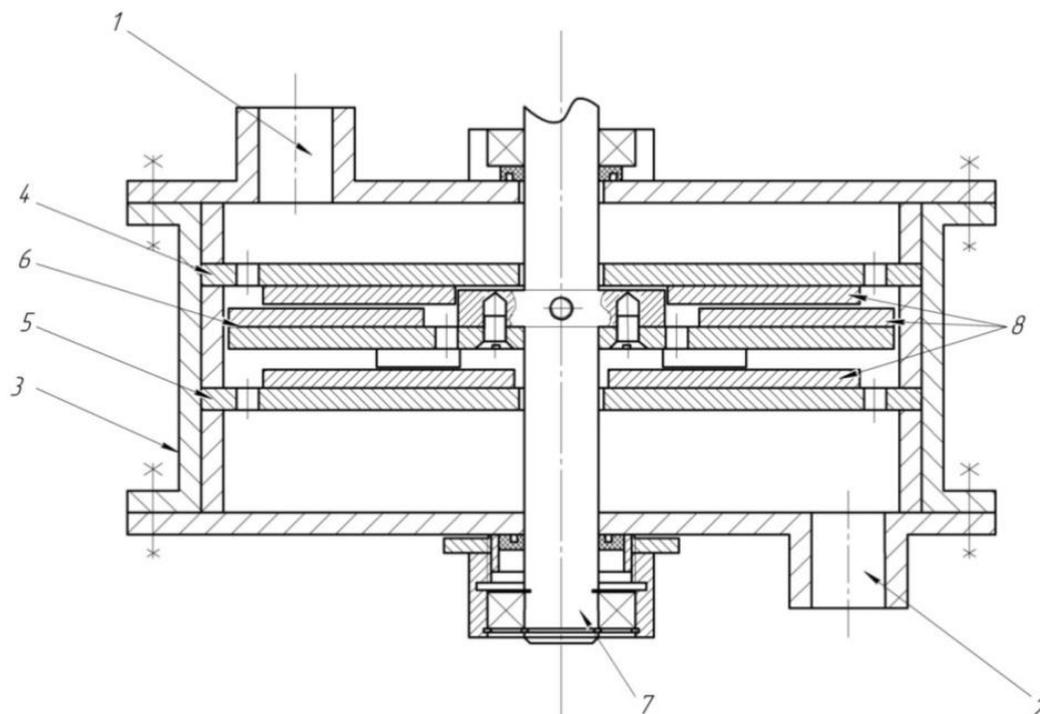
## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** приведено обоснование актуальности работы, её научная и практическая значимость, сформулированы основные задачи исследований и положения, которые выносятся на защиту.

**В первой главе** рассмотрены основные показатели процесса перемешивания. Приведен краткий анализ конструкций дисковых мешалок, а также аппаратов и устройств, имеющих рабочие органы в виде дисков. Выявлено, что рассмотренные конструкции имеют следующие недостатки: малоэффективное воздействие на обрабатываемую среду со стороны рабочих органов, малая производительность из-за низкой пропускной способности отдельных элементов аппарата, невысокая степень адаптивности к изменениям параметров обработки среды, высокое потребление электроэнергии, высокое гидравлическое сопротивление аппаратов, узкая область применения (например только для систем жидкость-газ, жидкость-жидкость), сложность конструкции аппарата.

Разработана конструкция малообъемного роторно-дискового смесителя с четырьмя вариантами исполнения рабочих органов (дисков), позволяющая свести к минимуму вышеперечисленные недостатки.

Малообъемный роторно-дисковый смеситель (рисунок 1) содержит загрузочный и разгрузочный патрубки, цилиндрический корпус, в объеме которого жестко зафиксированы неподвижные диски поочередно с подвижным, закрепленном на вращающемся валу (рисунок 2).



1 - загрузочный патрубок, 2 - разгрузочный патрубок, 3 - цилиндрический корпус, 4 и 5 - верхний и нижний неподвижные диски соответственно, 6 - подвижный диск, 7 - вал, 8 - дополнительные рабочие органы.

Рисунок 1 - Малообъемный роторно-дисковый смеситель

Малообъемный роторно-дисковый смеситель работает следующим образом: обрабатываемая среда поступает через входной патрубок, под действием массовых сил или искусственно создаваемого перепада давления продвигается к выходному патрубку. Проходя через рабочую зону аппарата, обрабатываемая среда подвергается интенсивному механическому и гидродинамическому воздействию со стороны рабочих органов. Зубья на вращающемся диске, при вращении последнего, способствуют созданию высокотурбулентных потоков, а также придают потокам вращательное движение.

Тем самым при совпадении частоты перекрытия перфораций и частоты вихреобразования генерируются пульсации давлений, положительно влияющих на процесс дробления капель дисперсной фазы. Частота пульсаций пропорциональна скорости вращения вала и количеству зубьев на дисках.

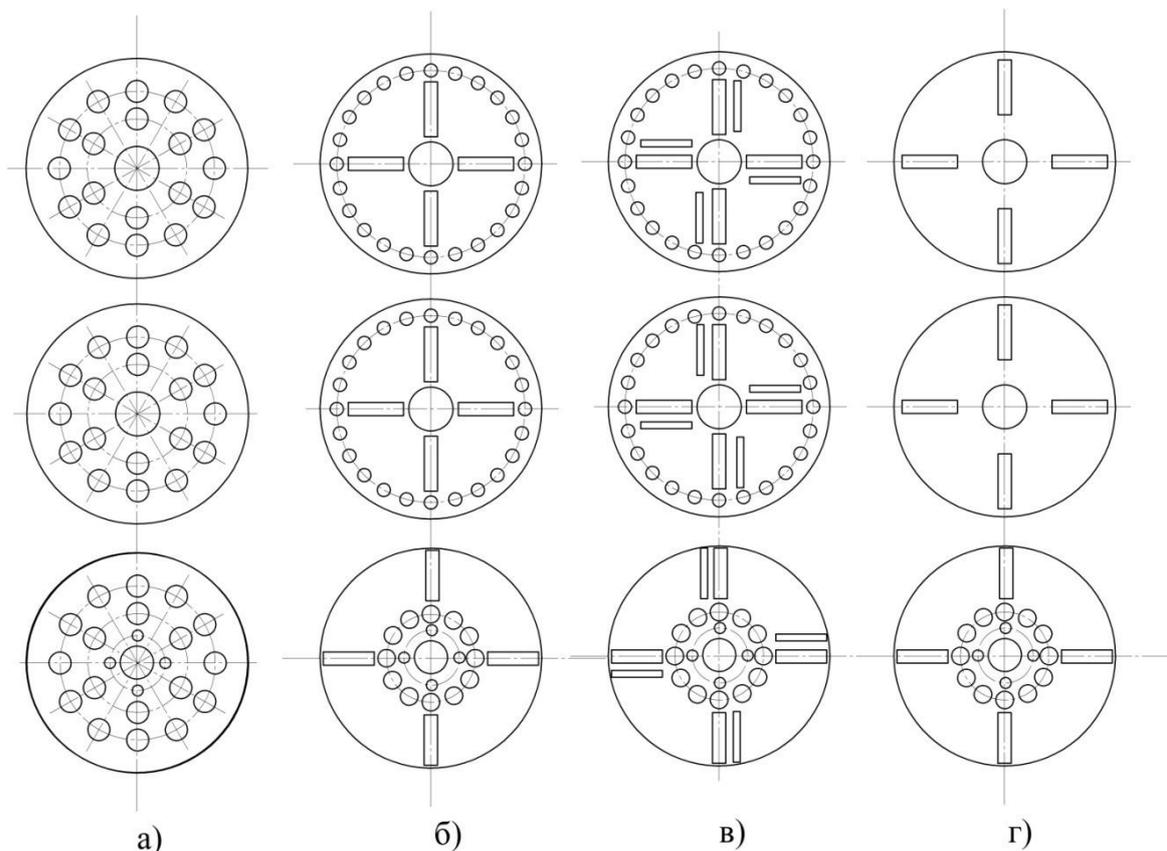


Рисунок 2 - Разработанные конструкции рабочих органов

Конструкция малообъемного роторно-дискового смесителя позволяет проводить установку в корпус подвижных и неподвижных дисков различных конструкций. Исследования проводились с четырьмя комплектами дисков, имеющих различные конструктивные особенности. Первый комплект (рисунок 2, а) состоит из гладких перфорированных дисков. Отверстия расположены таким образом, что при вращении ротора они поочередно совпадают и перекрываются с отверстиями подвижного диска. Обработываемая среда, проходя через рабочий объем аппарата, подвергается интенсивному механическому и гидродинамическому воздействию со стороны рабочих органов. Второй комплект (рисунок 2, б) состоит из двух неподвижных дисков с расположенными по периферии отверстиями и одного подвижного диска с отверстиями

расположенными по центру диска. На нижней стороне верхнего неподвижного, на верхней стороне нижнего неподвижного и на обеих сторонах подвижного диска имеются дополнительные рабочие органы в виде зубьев (лопаток) прямоугольного сечения, приваренных к дискам радиально. Третий комплект (рисунок 2, в) отличается от второго наличием прорезей по длине зуба на расстоянии от его основания, равной высоте. Четвертый комплект (рисунок 2 г) состоит из гладких неподвижных дисков с прорезями и расположенного между ними подвижного диска с отверстиями, расположенными по центру, и радиально расположенными зубьями, причем прорези на неподвижных дисках повторяют форму и расположение зубьев на подвижном диске. При вращении ротора зубья на подвижном диске перекрывают прорези на неподвижных дисках с определенной частотой и генерируют пульсации скорости жидкости.

Зазор между дисками выбирается посредством осевого перемещения вала и изменением высоты проставочных колец, удерживающих неподвижные диски. Экспериментальные исследования показали, что максимальная эффективность перемешивания достигается при наименьшем зазоре между зубьями. Однако по конструктивным соображениям минимальный зазор не следует устанавливать менее 1 мм ввиду осевого смещения вала и нарушения соосности из-за износа подшипников.

**Во второй главе** приведена разработка методов расчета малообъемных роторно-дисковых смесителей.

При обработке технологических жидкостей в роторно-дисковых смесителях затраты мощности будут определяться изменением кинетической энергии и энергией на дробление частиц эмульсии, определяемой энергией межфазного натяжения

$$P = \sum_{i=1}^n \frac{J_i \omega^2 G_v}{2V_i} + \frac{6\varphi}{d_k} \sigma G_v, \quad (1)$$

где  $\omega$  - угловая скорость вращения ротора;

$G_v$  - объемный расход обрабатываемой смеси;

$V_i$  - рабочий объем зазора между вращающимся и неподвижными дисками;

$J_i$  - момент инерции обрабатываемой смеси в зазоре между дисками;

$\varphi$  - объемная доля дисперсных частиц;

$d_k$  - усредненный диаметр дисперсных частиц;

$\sigma$  - коэффициент межфазного натяжения.

Коэффициент динамической вязкости пропорционален интенсивности турбулентного движения жидкости в зазоре и будет нарастать от значения коэффициента вязкости, при ламинарном режиме течения в вязком слое у неподвижного диска  $\mu$  до максимального значения в области вращающегося диска. Учитывая это, диссипируемая мощность  $N_i$  находится по формуле

$$N_i = 0,47 \left(\frac{\mu}{h}\right)^{\frac{1}{4}} \omega^{\frac{11}{4}} [\rho(R_D - R_B)]^{\frac{3}{4}} \left[1 + \left(\frac{2\mu}{\rho\omega(R_D - R_B) \cdot h}\right)^{\frac{3}{2}}\right] (R_D^4 - R_B^4), \quad (2)$$

где  $h$  - величина зазора между неподвижным и подвижным дисками;

$R_D$  и  $R_B$  - радиус диска и радиус вала соответственно;

$\rho$  - плотность смеси.

Из последнего выражения следует, что мощность, диссипируемая в зазоре между вращающимся и неподвижным диском, пропорциональна угловой скорости вращения  $\sim \omega^{2,75}$ .

С учетом влияния конструктивных параметров роторно-дисковых смесителей на размеры дисперсных частиц и толщины ламинарного слоя размер дисперсных частиц определяется по формуле

$$d_k \approx \frac{0,39\sigma^{\frac{3}{5}}V_i^{\frac{2}{5}}}{\rho^{\frac{1}{2}}\omega^{1,1}} \left(\frac{h}{\mu}\right)^{0,1} \frac{1}{(R_D - R_B)^{0,3} \left\{ \left[1 + \left(\frac{2\mu}{\rho\omega(R_D - R_B)h}\right)^{\frac{3}{2}}\right] (R_D^4 - R_B^4) \right\}^{\frac{2}{5}}}, \quad (3)$$

Из соотношения (3) видно, что характерный размер дисперсных частиц обратно пропорционален угловой скорости вращения  $\sim \omega^{-1,1}$ .

Если по технологическим требованиям задается поверхность контакта взаимодействующих веществ, что определяется размером дисперсных частиц  $d_k$ , то можно определить необходимую частоту вращения ротора смесителя по формуле

$$\omega = \left(\frac{0,32}{d_k}\right)^{\frac{5}{4}} \frac{\sigma^{\frac{3}{4}} V_i^{\frac{1}{2}}}{\left[\rho^{\frac{1}{2}} \frac{\mu}{\delta_0} \left(1 + \frac{\delta_0^2}{h^2}\right) (R_D^4 - R_B^4)\right]^{\frac{1}{2}}}, \quad (4)$$

где  $\sigma$  - коэффициент межфазного натяжения.

Из формулы (4) следует, что скорость вращения диска при заданном размере дисперсных частиц возрастает  $\sim$  межфазному натяжению  $\sim \sigma^{3/4}$ .

Учитывая выражение (3) для определения усредненного диаметра дисперсных частиц и определяя момент инерции обрабатываемой в аппарате смеси, получим уравнение для определения мощности роторно-дисковых аппаратов

$$P = \frac{\rho \omega^2 (R_D^2 - R_B^2) G_V}{4} \left\{ 1 + \frac{61,5 G^{0,4}}{\rho^{\frac{1}{2}} \omega^{0,9} V_i^{0,4}} \left(\frac{\mu}{h}\right)^{0,1} \frac{(R_g - R_B)^{0,3}}{R_D^2 - R_B^2} \left[ \left( 1 + \left( \frac{2\mu}{\rho \omega (R_D - R_B) h} \right)^{\frac{3}{2}} (R_D^4 - R_B^4) \right) \right]^{0,4} \right\}, \quad (5)$$

Соотношение (5) позволяет определить мощность роторно-дисковых аппаратов в зависимости от характеристик обрабатываемой смеси (плотность  $\rho$ , динамическая вязкость  $\mu$ , коэффициент межфазного натяжения  $\sigma$ ), конструктивных параметров аппарата (радиус дисков  $R_D$ , радиус вала  $R_B$ , величина зазора между вращающимся и неподвижным диском  $h$ , угловой скоростью вращения вала аппарата  $\omega$ ) и технологического параметра - объемного расхода обрабатываемой смеси  $G_V$ .

Все полученные выше соотношения позволяют оценить потребляемую мощность для роторно-дисковых смесителей с «гладкими» дисками, когда суммарная площадь поверхности перфораций  $S_{\Pi}$  много меньше площади поверхности диска  $\pi R_D^2$ . Если площадь поверхности перфораций и дополнительных элементов на вращающемся и неподвижных дисках увеличивается, то потребляемая мощность возрастает, так как увеличивается диссипация энергии из-за более интенсивного турбулентного движения обрабатываемой смеси. В этом случае потребляемая мощность оценивается по формуле

$$P = \left( \frac{S'_{\Pi}}{S'_{\Pi\Gamma}} \right)^{\alpha} P_{\Gamma}, \quad (6)$$

где  $P_{\Gamma}$  – мощность, определяемая по формуле (5);

$S_{\Pi}$  - площадь поверхности перфораций и дополнительных рабочих элементов (зубьев);

$S_{\Pi\Gamma}$  - площадь поверхности гладкого диска.

Показатель степени  $\alpha$  зависит от скорости вращения подвижного диска и изменяется от величины  $\alpha \approx 0,35$  при 1500 об/мин до  $\alpha \approx 0,49$  при 1000 об/мин.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований, целями которых явились:

1. Проверка разработанных методов расчета малообъемных роторно-дисковых смесителей, описывающих связь между потребляемой мощностью, конструктивными параметрами дисков и интенсивностью перемешивания;

2. Обоснование перспективности применения малообъемного роторно-дискового смесителя для проведения процессов карбонизации содового раствора и смешения дихлорэтана с щелочью, а так же исследование закономерностей протекания данных процессов в смесителе.

На экспериментальной установке для исследования характеристик малообъемного роторно-дискового смесителя были проведены испытания с четырьмя конструкциями рабочих органов, имеющими конструктивные отличия.

В качестве компонентов обрабатываемой смеси использовались: вода ( $\rho=998$  кг/м<sup>3</sup>, динамическая вязкость 1004 мкПа·с, кинематическая вязкость  $1,006 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, поверхностное натяжение 0,07 Н/м (при 293К) и дизельное топливо ( $\rho=860$  кг/м<sup>3</sup>, динамическая вязкость 560 мкПа·с, кинематическая вязкость  $0,62 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с (при 293К).

Эксперименты проводились следующим образом: устанавливалась частота вращения ротора роторно-дискового смесителя, в заданной пропорции подавались во входные патрубки компоненты смеси, при помощи крана на выходном патрубке устанавливался расход обрабатываемой смеси, измерялась потребляемая мощность, фотометрическим методом исследовался дисперсный

состав полученной эмульсии. После проведения всех необходимых исследований менялся комплект дисков, и эксперименты повторялись.

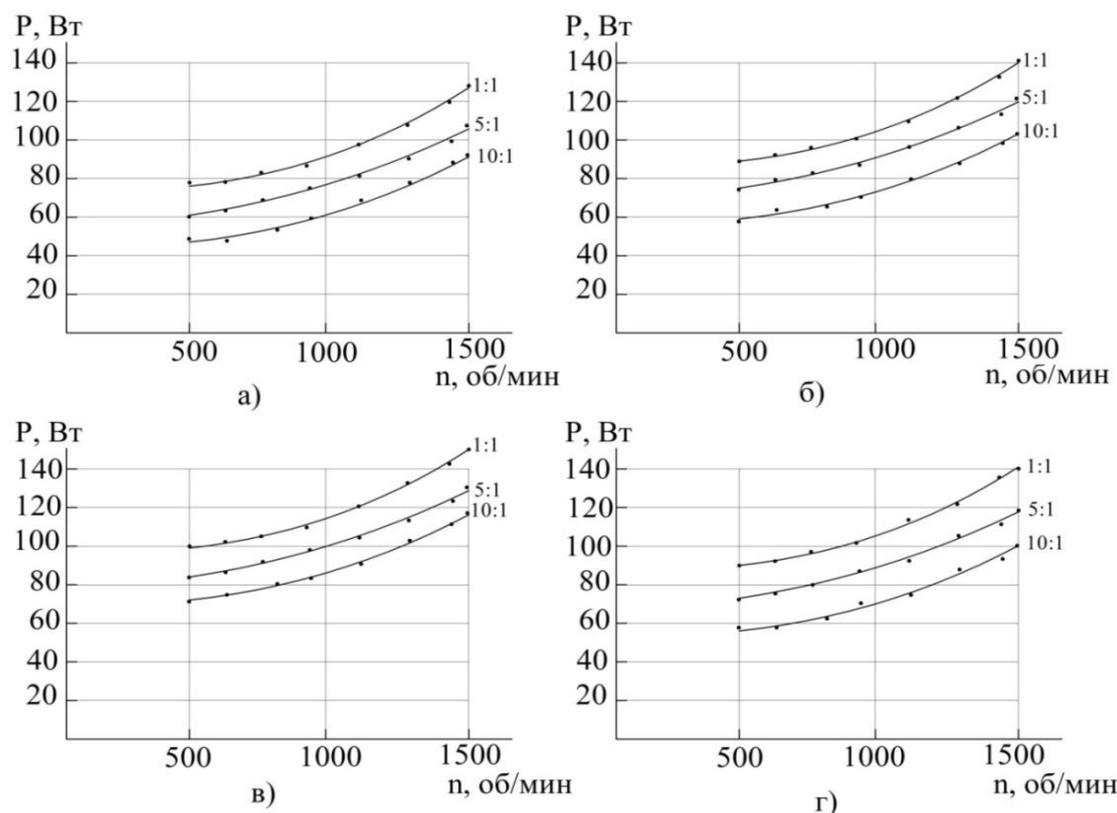
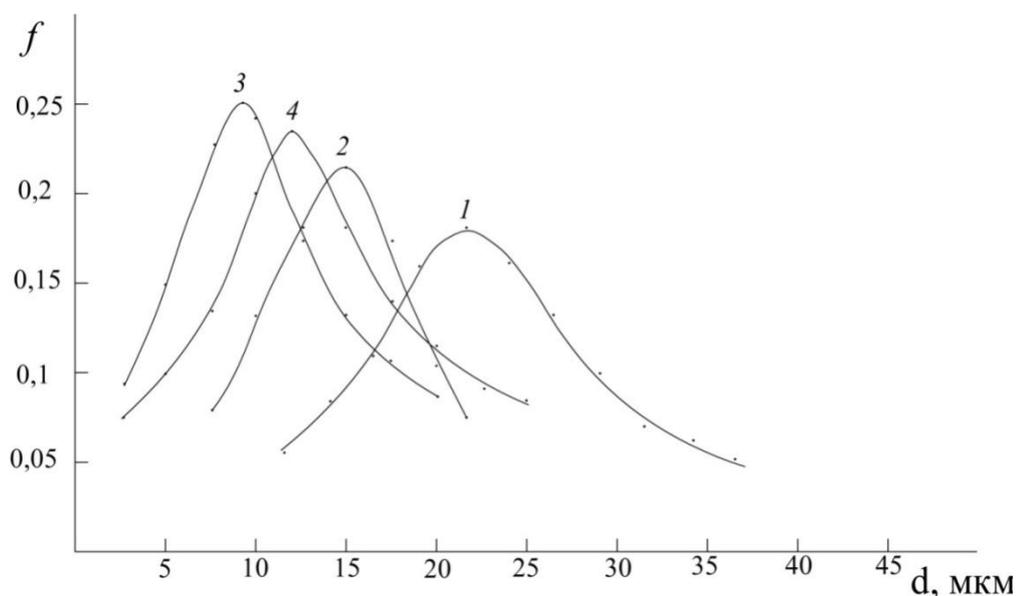


Рисунок 3 - Зависимость потребляемой мощности на перемешивание от скорости вращения ротора при различных соотношениях вода/дизельное топливо, а) для первого, б) второго, в) третьего, г) четвертого комплектов дисков.

На рисунке 3 приведены зависимости потребляемой мощности от скорости вращения ротора при различном соотношении компонентов смеси вода - дизельное топливо для четырех комплектов дисков и объемным расходом среды  $Q=0,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Из зависимостей видно, что при увеличении объемной доли дизельного топлива потребляемая мощность возрастает. Это объясняется тем, что возрастает концентрация дисперсных частиц, а следовательно, возрастает количество энергии необходимой для диссипации, которое пропорционально величине межфазной поверхности и межфазному натяжению. Сравнение теоретических расчетов потребляемой мощности с результатами экспериментального исследования показало, что расхождение значений составляет не более 10%. Следовательно, предложенная для расчета мощности зависимость может быть использована при расчете и проектировании малообъемных роторно-дисковых смесителей.



1,2,3,4 - первый, второй, третий и четвертый комплекты дисков соответственно.

Рисунок 4 - Распределения дисперсных частиц по размерам при числе оборотов ротора  $n=1500$  об/мин. и объемном расходе среды  $Q=0,2$  м<sup>3</sup>/ч.

Исследования показали, что увеличение площади перфораций на рабочих органах и расположение дополнительных рабочих органов (зубьев) на дисках приводит к общему уменьшению размеров дисперсных частиц. При этом уменьшается разброс размеров частиц (Рисунок 4).

Из зависимостей (рисунок 5) видно, что с увеличением объемной доли дисперсной фазы усредненный размер частиц увеличивается вследствие повышения концентрации и частоты столкновения дисперсных частиц приводящих к коалиценции. Установлено, что размер частиц дисперсной фазы уменьшается обратно пропорционально скорости вращения ротора, что совпадает с теоретической зависимостью (формула 3).

Экспериментальные исследования процесса карбонизации содового раствора с использованием малообъемного роторно-дискового смесителя проводились на установке, изображенной на рисунке 6. Исследования проводили с четырьмя комплектами дисков, изображенных на рисунке 2. Роторно-дисковый смеситель имеет следующие конструктивные параметры: объем аппарата  $V=0,8 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>,  $R_d=6,125 \cdot 10^{-2}$  м.

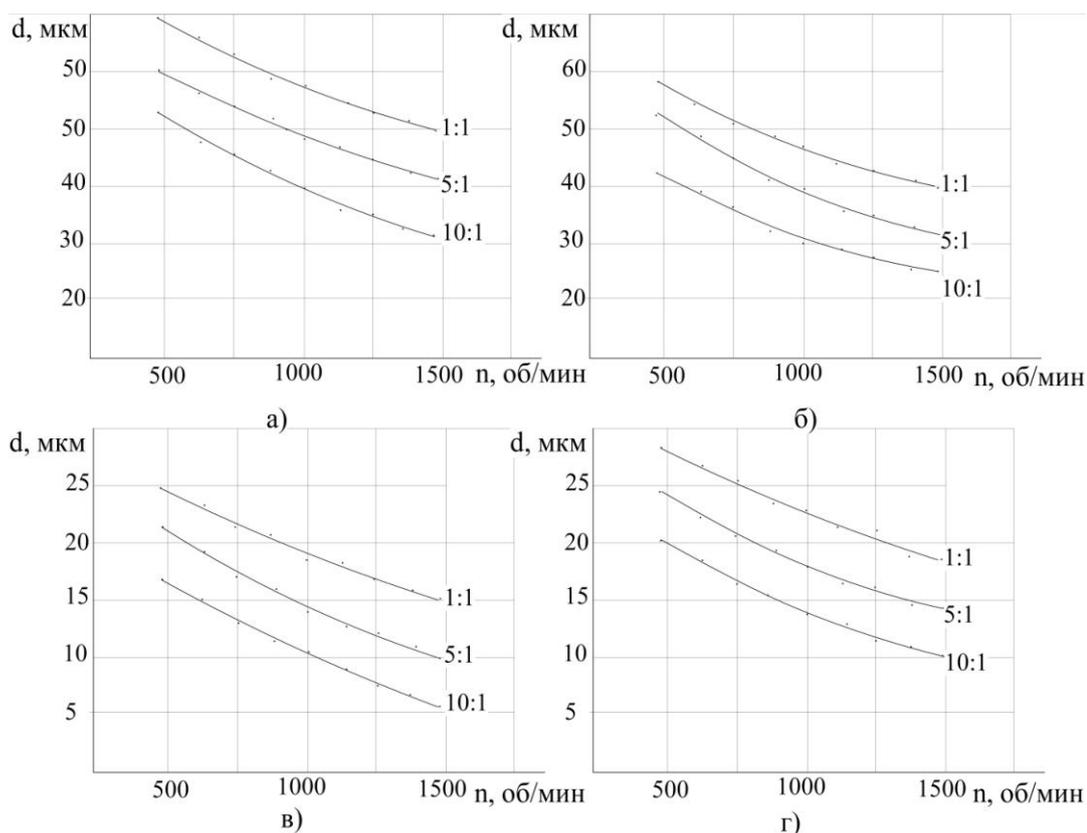
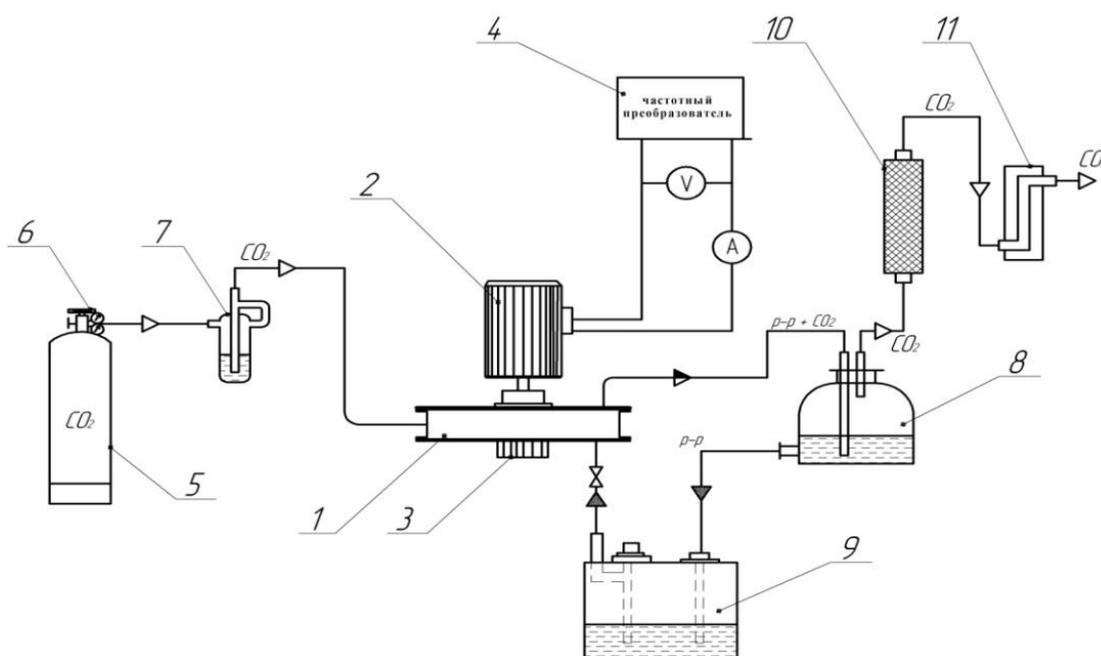


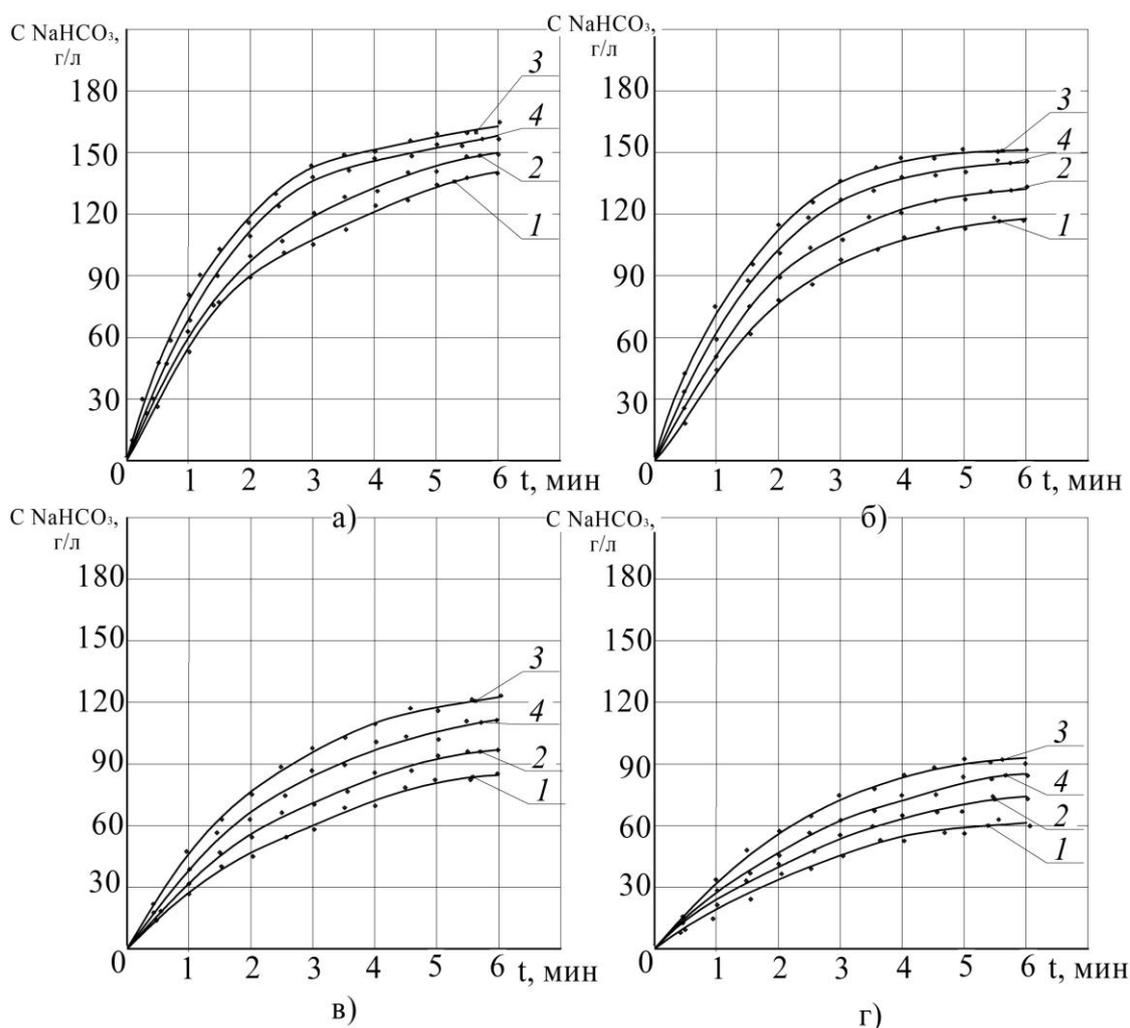
Рисунок 5 - Зависимости усредненного размера дисперсных частиц от числа оборотов ротора при объемном расходе смеси  $Q=0,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ , а) первый, б) второй, в) третий, г) четвертый комплект дисков



1- роторно-дисковый смеситель, 2 - двигатель, 3 - регулировочная гайка, 4 - частотный преобразователь, 5 -баллон с газом  $\text{CO}_2$ , 6 - редуктор, 7 - влажный реометр, 8 - емкость для отделения газа, 9 - емкость с насосом, 10 - адсорбер, 11 - сухой реометр.

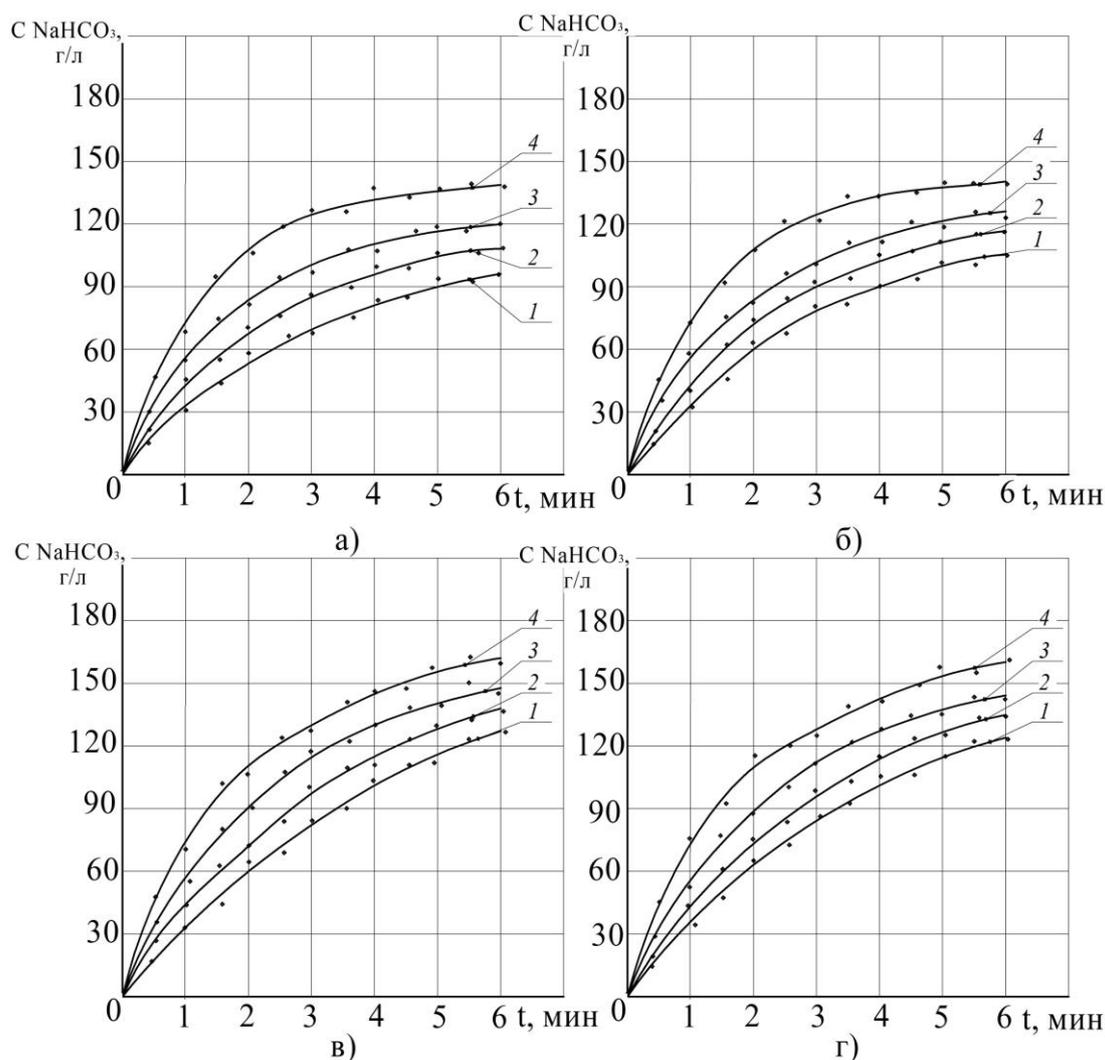
Рисунок 6 - Схема экспериментальной установки

Из представленных зависимостей (рисунок 7,8) видно, что с увеличением времени пребывания содового раствора в аппарате концентрация бикарбоната натрия после обработки повышается. Это объясняется тем, что с увеличением времени обработки среды в роторно-дисковом смесителе, образуются капли дисперсной фазы меньшего размера, следовательно, увеличивается площадь межфазной поверхности и массообмен. Кроме того, снижение количества подаваемого диоксида углерода приводит к более эффективному его использованию.



1,2,3,4 - первый, второй, третий и четвертый комплекты дисков соответственно.

Рисунок 7 - Изменение концентрации бикарбоната натрия в растворе в зависимости от времени обработки раствора в роторно-дисковом смесителе, а) при числе оборотов  $n=1500$  об/мин., б) при  $n=1250$  об/мин., в) при  $n=1000$  об/мин., г) при  $n=750$  об/мин.

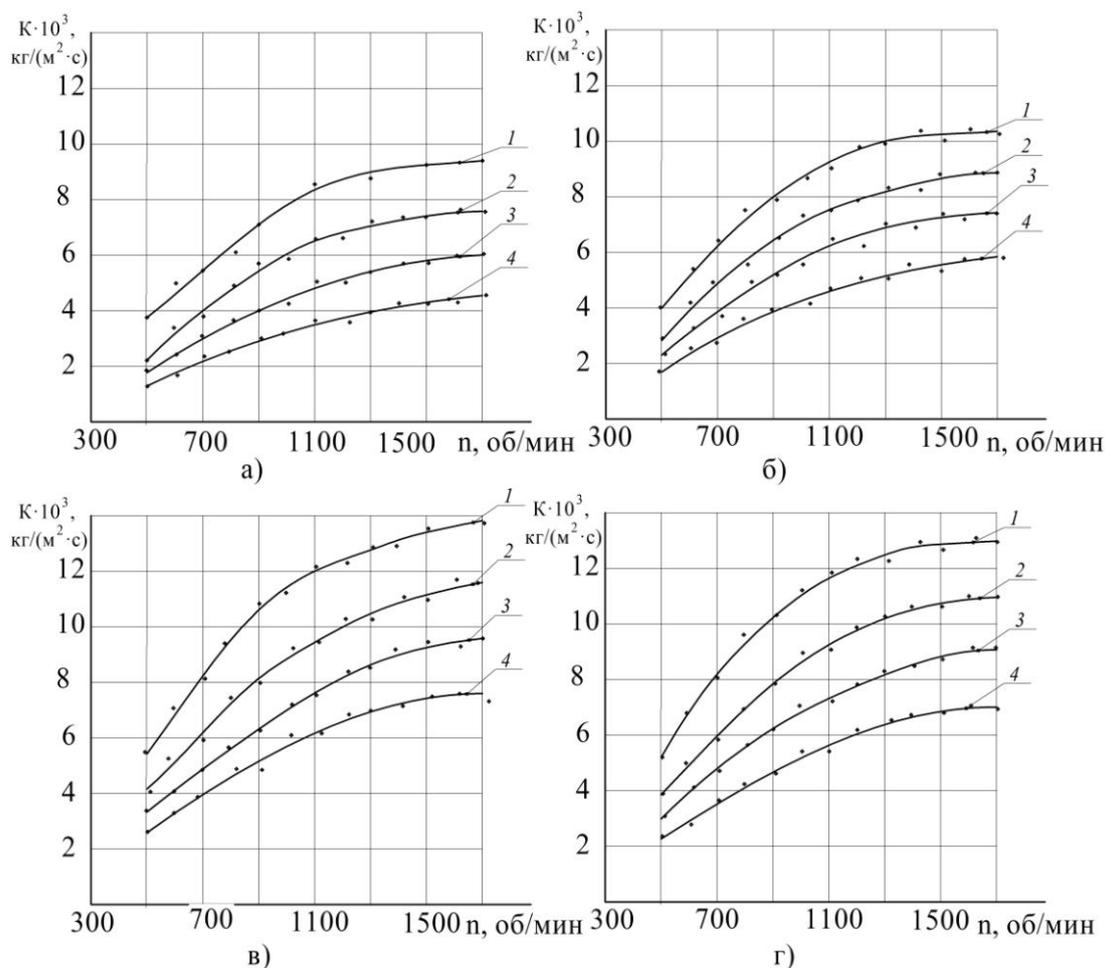


1 -  $Q_{4\text{вхCO}_2}=2$  л/мин, 2 -  $Q_{3\text{вхCO}_2}=3$  л/мин, 3 -  $Q_{2\text{вхCO}_2}=4$  л/мин, 4 -  $Q_{1\text{вхCO}_2}=5$  л/мин.

Рисунок 8 - Изменение концентрации бикарбоната натрия в растворе в зависимости от времени обработки раствора в роторно-дисковом смесителе при различном количестве подаваемого диоксида углерода, а) для первого, б) второго, в) третьего, г) четвертого комплектов дисков

Анализ кривых (рисунок 9) показывает, что массообмен протекает наиболее эффективно с увеличением расхода диоксида углерода. Это происходит из-за увеличения величины межфазной поверхности при увеличении расхода газа. При всех рассмотренных величинах расхода газа и всех конструкциях дисков наблюдается снижение роста коэффициента массопередачи на скоростях вращения ротора выше 1500 об/мин. Дальнейшее увеличение скорости вращения ротора не приводит к повышению эффективности процесса, при этом возрастают энергозатраты. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что

третий комплект дисков малообъемного роторно-дискового смесителя является наиболее эффективным из рассмотренных.



1 -  $G=16,4 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}$ , 2 -  $G=13,1 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}$ , 3 -  $G=9,8 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}$ , 4 -  $G=6,5 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}$ .

Рисунок 9 - Зависимость коэффициента массопередачи от скорости вращения ротора для, а) первого, б) второго, в) третьего, г) четвертого комплектов дисков

Экспериментальные исследования по очистке дихлорэтана (ДХЭ) от побочных продуктов в производстве винилхлорида проводились на установке со следующими параметрами роторно-дискового смесителя: объем аппарата  $V=0,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ,  $R_{\text{д}}=6,125 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ . Способ очистки ДХЭ от побочных продуктов заключается в смешении его с раствором щелочи (NaOH).

На рисунке 10 изображена схема узла нейтрализации и отмывки. Согласно данной схеме смешивание ДХЭ с щелочью происходит в сопловом смесительном устройстве. На рисунке 11 изображена схема узла нейтрализации с использованием роторно-дискового смесителя.

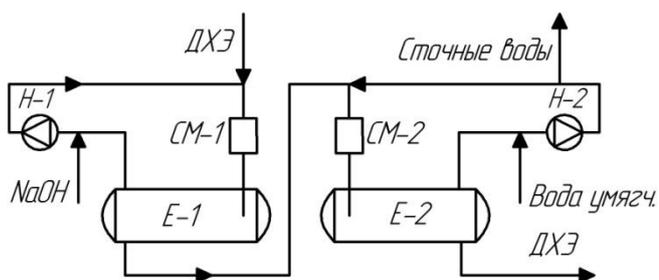


Рисунок 10 - Схема узла  
нейтрализации и отмывки ДХЭ

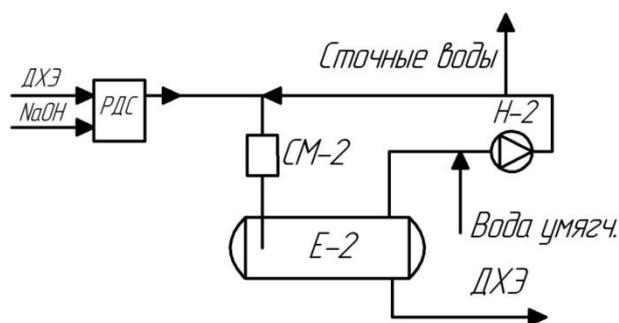


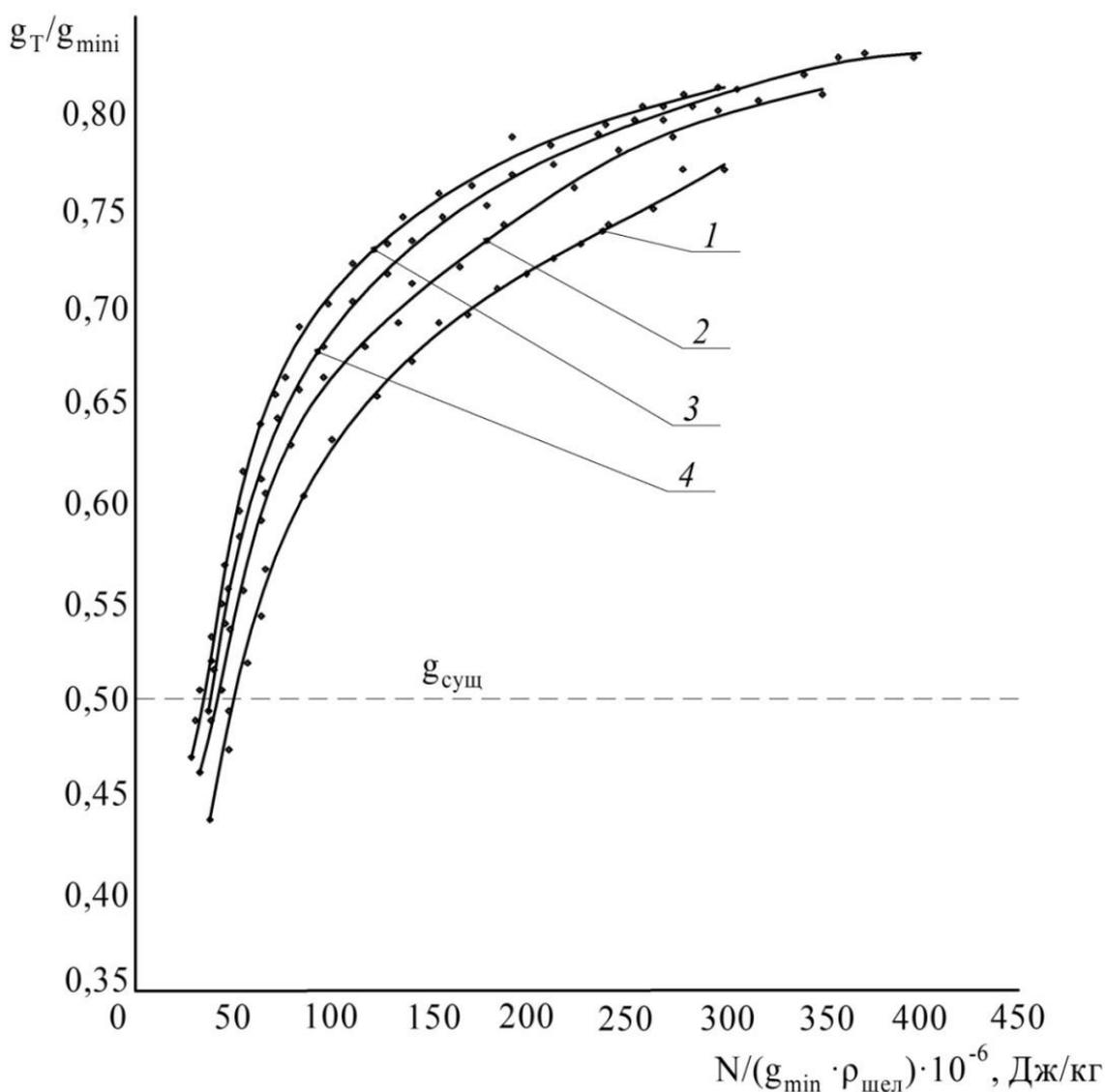
Рисунок 11 - Схема узла нейтрализации  
и отмывки ДХЭ с малообъемным  
роторно-дисковым смесителем

В процессе исследования всех комплектов дисков и параметров обработки определялся расход щелочи  $g_{\min}$  м<sup>3</sup>/ч, способный обеспечить при заданных условиях полную нейтрализацию побочных продуктов. Также регистрировалась мощность, потребляемая двигателем роторно-дискового смесителя  $N_i$ . Значения  $g_{\min}$  сравнивали с минимальным значением, найденным теоретически  $g_T=0,0225$  м<sup>3</sup>/ч, необходимым для полной нейтрализации побочных продуктов из ДХЭ. По значению  $g_T/g_{\min}$ , соотнесенному к величине  $\frac{N}{g_{\min} \cdot \rho_{\text{щел}}}$  (где  $\rho_{\text{щел}}$  - плотность щелочи, кг/м<sup>3</sup>), получали графическую зависимость для исследуемых комплектов дисков (рисунок 12).

Полученные графические зависимости характеризуют эффективность процесса перемешивания ДХЭ с щелочью. При наибольшем значении соотношения  $g_T/g_{\min}$  и наименьшем значении затрачиваемой мощности, приведенной к массовому расходу  $\frac{N}{g_{\min} \cdot \rho_{\text{щел}}}$ , эффективность процесса возрастает. По графическим зависимостям определяем оптимальные параметры работы малообъемного роторно-дискового смесителя.

Экспериментальные исследования показали, что наиболее эффективен третий комплект дисков роторно-дискового смесителя. Оптимальными параметрами обработки явились: число оборотов ротора  $n=1100-1250$  об/мин, минимальный необходимый расход щелочи, для полной нейтрализации побочных продуктов из ДХЭ  $g_{\min}=34,6-36,9$  м<sup>3</sup>/ч, потребляемая мощность составила  $N=1005-1103$  Вт.

Экспериментально подтверждено, что малообъемный роторно-дисковый смеситель может быть использован в процессе удаления кислородосодержащих хлорированных углеводородов и хлористого водорода из дихлорэтана, кроме того, повысилась эффективность процесса смешения, что привело к снижению расхода щелочи на 20,6%. За счет удаления емкости Е-1 и насоса Н-1 упростилась технологическая схема установки и повысилось качество целевого продукта.



1 - первый комплект дисков, 2 - второй комплект дисков, 3 - третий комплект дисков, 4 - четвертый комплект дисков.

Рисунок 12 - Зависимость  $g_T/g_{\min_i}$  от  $N/(g_{\min} \cdot \rho_{\text{щел}}) \cdot 10^{-6}$  для различных конструкций дисков

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработаны три конструкции малообъемного роторно-дискового смесителя, отличающиеся конструктивным оформлением рабочих органов, для перемешивания неоднородных сред в системах жидкость-жидкость, газ-жидкость.

2. Разработан метод расчета, связывающий геометрические параметры аппарата, особенности конструкции рабочих органов, свойства обрабатываемой среды и затраты мощности. Установлено, что мощность, диссипируемая в зазоре между вращающимся и неподвижным диском, пропорциональна угловой скорости вращения  $\sim \omega^{2,75}$ , а характерный размер дисперсных частиц обратно пропорционален угловой скорости вращения  $\sim \omega^{-1,1}$ .

3. Разработана установка для экспериментального исследования малообъемных роторно-дисковых смесителей и энергозатрат при обработке смесей.

4. Из сравнения экспериментальных и расчетных данных по затратам мощности и усредненному размеру дисперсных частиц показано удовлетворительное совпадение. Отклонение не превышает  $\sim 10\%$ .

5. Проведены экспериментальные исследования малообъемного роторно-дискового смесителя в процессах карбонизации содового раствора и очистки дихлорэтана от побочных продуктов. Экспериментально выявлены факторы, влияющие на обработку неоднородных сред. Определены оптимальные скорости вращения ротора и варианты конструктивного исполнения аппарата.

### **Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:**

#### **В патентах**

1. Патент №161841 (РФ), МПК В02С 7/08. Роторный измельчающий смеситель / Лапонов С.В., Шулаев Н.С., Ибрагимов И.Г., Иванов С.П., Бондарь К.Е. // - №2015149990. Заявл. 20.11.2015; опубл. 10.05.2016, бюл. № 13.

2. Патент №174991 (РФ), МПК В02С 7/08. Турбинный дисковый смеситель / Лапонов С.В., Шулаев Н.С., Ибрагимов И.Г., Иванов С.П. // - №2017115105. Заявл. 27.04.2017; опубл. 15.11.2017, бюл. № 32.

3. Патент №178251 (РФ), МПК В02С 7/08. Дискосый смеситель / Лапонов С.В., Шулаев Н.С., Ибрагимов И.Г., Иванов С.П. // -№2017124556. Заявл. 10.07.2017; опубл. 28.03.2018, бюл. № 10.

4. Патент №180435 (РФ), МПК В02С 7/08. Дискосый роторный смеситель / Лапонов С.В., Шулаев Н.С., Ибрагимов И.Г., Иванов С.П., Сулейманов Д.Ф. // -№2018106626. Заявл. 21.02.2018; опубл. 14.06.2018, бюл. № 17.

5. Патент №183634 (РФ), МПК В02С 7/08. Турбинный дискосый смеситель / Лапонов С.В., Бухмастов А.А., Раянов Д.Н., Иванов С.П., Сулейманов Д.Ф. // -№2018118109. Заявл. 16.05.2018; опубл. 28.09.2018, бюл. №28.

6. Патент №185838 (РФ), МПК В02С 7/08. Роторный измельчающий смеситель / Лапонов С.В., Тимофеев А.Р., Хабибуллина З.В., Иванов С.П., Бондарь К.Е. // -№2018125518. Заявл. 11.07.2018; опубл. 19.12.2018, бюл. № 35.

#### **В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ**

7. Лапонов, С.В. Особенности эмульгирования в роторно-дискосых смесителях / С.В. Лапонов, Н.С. Шулаев, И.Г. Ибрагимов, С.П. Иванов // Нефтегазовое дело. 2016. Т.14. №4. С. 126-129.

8. Лапонов, С.В. Эмульгирование жидкостей в роторно-дискосых смесителях / С.В. Лапонов, С.П. Иванов, Т.В. Шулаева, И.Г. Ибрагимов // Фундаментальные исследования. 2018. №2. С. 12-16.

9. Лапонов, С.В. Карбонизация содового раствора в роторно-дискосых реакторах / С.В. Лапонов, Н.С. Шулаев, С.П. Иванов, И.Г. Ибрагимов // Бутлеровские сообщения. 2018. Т.53. №3. С. 118-123.

10. Лапонов, С.В. Влияние конструктивных особенностей роторно-дискосых смесителей на дисперсный состав эмульсий / С.В. Лапонов, Н.С. Шулаев, С.П. Иванов, И.Г. Ибрагимов // Труды РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. 2018. №1/290. С. 72-81.

11. Лапонов, С.В. Научно-исследовательский стенд для изучения характеристик роторно-дискосых смесителей / С.В. Лапонов, К.Е. Бондарь, В.А. Рудковский, А.В. Брежнев // Естественные и технические науки, №5. 2018. С.193-195.

#### **В изданиях, индексируемых базой данных Scopus**

12. S.V. Laponov. Modeling of emulsification processes in rotary-disk mixers. Earth and Environmental Science / S.V. Laponov, N.S. Shulaev, S.P. Ivanov, D.F. Suleimanov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 87. – P. 082028.

#### **В материалах международных научно-практических конференций**

13. Лапонов, С.В. Перспективы применения роторно-дискосых смесителей в процессах химической технологии / С.В. Лапонов, О.С. Иванов // Вестник молодого ученого УГНТУ, №1(01). 2015. С.16-19.

14. Лапонов, С.В. Применение малообъемных роторно-дискосых смесителей на химических и нефтеперерабатывающих предприятиях / С.В. Лапонов // Шестьдесят девятая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием, ЯГТУ г.Ярославль 2016, С.540-543.

15. Лапонов, С.В. Совместная и отдельная подача сырья в малообъемный роторный дезинтегратор-смеситель / С.В. Лапонов // Сборник тезисов 70 международная молодежная научная конференция «Нефть и газ 2016» Москва. 2016.Т.2 С.374.

16. Лапонов, С.В. Определение напорных характеристик при турбулентном движении жидких сред в технологической аппаратуре / С.В. Лапонов, Т.В. Шулаева, Ю.Ф. Коваленко // Сборник материалов внутривузовской научно-практической конференции, 2016г. С.316-318.

17. Лапонов, С.В. Применение роторно-дискового смесителя для проведения процесса однократной экстракции / С.В. Лапонов // 71-я международная молодежная научная конференция нефть и газ 2017, Москва. С.218.

18. Лапонов, С.В. Плюсы и минусы отдельной подачи компонентов смеси в роторно-дисковый смеситель / С.В. Лапонов // 9 Международная научно-практическая конференция молодых ученых "Актуальные проблемы науки и техники -2016". Т.2. 2016г. С. 64-65.

19. Лапонов, С.В. Перспективы интеграции фотометрического метода исследования эмульсии для определения остаточного ресурса роторно-дисковых смесителей / С.В. Лапонов., К.Е. Бондарь, Д.Ф. Сулейманов // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Современные тенденции подготовки кадров для нефтегазовой отрасли». Атырау. 22.02.2018. С. 123-127.

20. Лапонов, С.В. Применение роторно-дисковых смесителей на нефтехимических предприятиях / С.В. Лапонов // Материалы Международной научно-практической конференции под общей редакцией А.И. Вострцова «Развитие современной науки: тенденции проблемы, перспективы». Г. София, Болгария 21.04.2018. С. 78-81.

21. Лапонов, С.В. Лабораторный стенд для изучения характеристик роторно-дисковых смесителей / С.В. Лапонов // Материалы Международной научно-практической конференции «Современная наука: Проблемы и перспективы». г. Душанбе, Таджикистан 12.05.2018. С. 17-20.

22. Лапонов, С.В. Роторный измельчающий смеситель / С.В. Лапонов // Материалы Международной научно-практической конференции «Современные тенденции в науке и образовании». г. Астана, Казахстан 15.05.2018. С. 52-55.

23. Лапонов, С.В. Расчет затрат мощности в процессах эмульгирования / С.В. Лапонов, Н.С. Шулаев, Т.В. Шулаева // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Современные технологии в нефтегазовом деле-2018» г. Уфа 30.03.2018. Т.2. С.224-226.