

*На правах рукописи*



МУЛЛАБАЕВ КАМИЛЬ АЗАМатович

**ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ  
УСТРОЙСТВ В НАСАДОЧНЫХ ЭКСТРАКЦИОННЫХ АППАРАТАХ**

2.6.13. – Процессы и аппараты химических технологий

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Уфа – 2024

Работа выполнена на кафедре «Нефтехимия и химическая технология» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель доктор технических наук, доцент  
**Чуракова Светлана Константиновна**

Официальные  
оппоненты: **Чесноков Юрий Георгиевич**  
доктор физико-математических наук, доцент  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный  
технологический институт (технический университет)»  
/ Кафедра процессов и аппаратов, профессор

**Меренцов Николай Анатольевич**  
кандидат технических наук, доцент  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Волгоградский государственный технический  
университет» / кафедра «Процессы и аппараты  
химических и пищевых производств», доцент

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Ярославский государственный технический  
университет»

Защита диссертации состоится 29 мая 2024 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.428.02 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 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 диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Бадикова Альбина Дарисовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Экстракционные процессы нашли широкое применение в нефтегазоперерабатывающей и нефтехимической отраслях промышленности. Как известно, эффективность процесса экстракции определяется не только гидравлическими и массообменными характеристиками применяемых контактных устройств, но также во многом зависит от распределения фаз в аппарате. На текущий момент существующий уровень знаний располагает недостаточной информацией, касающейся некоторых аспектов конструирования внутренних распределительных устройств в экстракционных колоннах. Во многом это связано со сложностью физического моделирования на реальных средах, а также со сложностями материально-технического обеспечения для проведения экспериментальных и опытно-промышленных исследований. Для поиска путей модернизации распределительных устройств и перераспределителей жидкости актуальным становится привлечение вычислительных мощностей, связанных с проведением CFD-анализа. При анализе эффективности работы распределительных устройств методами CFD-анализа зачастую обходятся лишь иллюстрациями с полями распределения скоростей, получаемыми по окончании гидродинамического расчета, количественная оценка эффективности распределения при этом не проводится. По этой причине, на текущий момент важна не только разработка технических решений по совершенствованию конструктивного оформления распределительных устройств, но и формирование различных подходов к моделированию процессов распределения потоков, а также разработка методов количественной оценки эффективности распределения фаз в экстракционных аппаратах с применением методов вычислительной гидродинамики.

### **Степень разработанности темы исследования**

Проблемам исследования распределительных устройств и перераспределителей жидкости в аппаратах колонного типа посвящены работы следующих российских и зарубежных учёных: Г.К. Зиганшин, И.А. Александров, В.С. Леонтьев, F. Hanusch, H. Klein, A. Higler и др. Расчетному анализу работы внутренних устройств с применением современных CFD-систем посвящены работы следующих ученых: О.М. Флисюк, Ю.Г. Чесноков, Н.А. Марцулевич, Р.Г. Зиганшин, E. Stenmark, R. Rahimi, M. Zivdar, M. Haghshenasfard и др.

### **Соответствие паспорту заявленной специальности**

Тема и содержание диссертационной работы соответствует формуле специальности 2.6.13: совершенствование аппаратного оформления технологических процессов с позиций энерго- и ресурсосбережения. Область исследования: исследование гидродинамических процессов в колонных технологических аппаратах.

**Целью диссертационной работы** является исследование гидродинамических процессов, протекающих при распределении и перераспределении потоков сплошной и дисперсной фаз в насадочных экстракторах, а также разработка технических решений по совершенствованию конструктивного оформления распределительных и перераспределительных устройств.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие **задачи**:

1. Обзор существующих конструкций распределителей дисперсной фазы и анализ их работы методами CFD-анализа;
2. Разработка конструктивных решений по распределительным устройствам для повышения эффективности распределения дисперсной фазы в насадочных экстракторах;
3. Создание математического аппарата для количественной оценки равномерности распределения сплошной и дисперсной фаз в колонных аппаратах;

4. Анализ влияния конструктивных особенностей перераспределителей жидкости на равномерность распределения сплошной и дисперсной фаз в аппарате методами CFD-анализа;

5. Разработка конструктивных решений по перераспределителям жидкости для увеличения эффективности распределения фаз в насадочных экстракторах.

#### **Научная новизна**

1. Предложены расчетные показатели для количественной оценки равномерности распределения сплошной и дисперсной фаз в экстракционных аппаратах, на основе которых разработана методика оценки равномерности распределения фаз в распределительных и перераспределительных устройствах.

2. Показано, что для систем «жидкость-жидкость» эффективность распределения дисперсной фазы в трубчатом распределителе может быть увеличена путем кратковременного перехода в развитый струйный режим с последующим возвратом в рабочий режим. Определены условия, при которых возможно увеличение эффективности распределения дисперсной фазы указанным способом.

3. Получены зависимости показателей эффективности распределения сплошной и дисперсной фаз от конструктивных параметров перераспределительных тарелок при фиксированных жидкостных нагрузках в экстракционном аппарате.

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

Для систем «жидкость-жидкость» проанализировано влияние скорости дисперсной фазы в отверстиях и соотношения диаметров боковых трубок и отверстий на эффективность распределения дисперсной фазы. Показано, что трубчатый распределитель дисперсной фазы в экстракционных аппаратах целесообразно проектировать таким образом, чтобы площадь поперечного сечения всех отверстий в боковой трубке составляла 26-28 % от площади поперечного сечения боковой трубки.

Разработана улучшенная конструкция трубчатого распределителя дисперсной фазы, позволяющая увеличить эффективность распределения потока, в том числе в области низких нагрузок по дисперсной фазе. Показано, что по сравнению с типовыми конструкциями трубчатых распределителей предлагаемая конструкция обеспечивает эффективное распределение потока в более широком диапазоне изменения подач дисперсной фазы (диапазон эффективной работы увеличен в среднем на 41 %). Получен патент на полезную модель № 219832 (РФ) МПК В01В 1/14, В01D 53/18.

Применительно к системам «жидкость-жидкость» определены диапазоны изменения нагрузок в трубчатых распределителях дисперсной фазы типовой конструкции и трубчатых распределителях с боковыми трубками, имеющими дополнительное отверстие для вытеснения сплошной фазы, при различном соотношении сечения боковой трубки и сечения всех отверстий: для типовой конструкции распределителя 2,2 – 2,6, для предлагаемой конструкции распределителя 3,1 – 3,7.

Разработана принципиально новая конструкция перераспределителя жидкости в экстракционной колонне, которая позволяет улучшить равномерность распределения сплошной и дисперсной фаз в условиях высокой нагрузки по сплошной фазе. Показано, что по сравнению с типовыми конструкциями перераспределительных тарелок предлагаемая конструкция обеспечивает увеличение эффективности распределения дисперсной фазы на 2-3 % и снижение интенсивности обратного перемешивания сплошной фазы на входе в перераспределитель на 4-10 %. Получен патент на изобретение № 2783943 (РФ) МПК В01D 3/22.

В соответствии с разработанной методикой оценки эффективности распределения фаз выданы рекомендации по конструированию перераспределительных тарелок в насадочных

экстракционных аппаратах. Выполнен расчет и подбор внутренних распределительных устройств в колонне аминовой очистки СУГ К-6 и колонне демеркаптанализации СУГ К-8 блока получения сжиженных углеводородных газов установки ЭЛОУ-АВТ-2,5(II) АО «Новошахтинский завод нефтепродуктов». Получен акт внедрения.

Разработан алгоритм расчета процесса распределения потока в распределительном устройстве, алгоритм расчета основных конструктивных размеров распределителей и перераспределителей жидкости, алгоритм расчета требуемого диаметра насадочного экстрактора. Получены 3 свидетельства о регистрации программ на ЭВМ № 2023686471, № 2023617701, № 2023619836, которые предназначены для выполнения инженерных расчетов экстракционных аппаратов работниками нефтегазоперерабатывающей промышленности.

Разработано учебное пособие по технологическому и гидравлическому расчету колонн жидкостной экстракции, в том числе на ЭВМ. Данное пособие может быть полезным при обучении студентов технических специальностей в рамках курса «Процессы и аппараты химической технологии», а также для выполнения технологических и гидравлических расчетов оборудования работниками нефтяной промышленности. Получена справка о внедрении.

#### **Методология и методы исследования**

Решение поставленных задач осуществлялось на основе: экспериментальных стендовых испытаний по истечению капель дисперсной фазы, расчетном исследовании конструкций трубчатых распределителей дисперсной фазы и перераспределителей жидкости методами вычислительной гидродинамики.

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

1. Рекомендации по улучшению равномерности распределения дисперсной фазы, в том числе условия, при которых возможно увеличение эффективности распределения дисперсной фазы в трубчатом распределителе путем кратковременного перехода в развитый струйный режим с последующим возвратом в рабочий режим.
2. Результаты расчетных исследований трубчатых распределителей дисперсной фазы, требуемые соотношения поперечного сечения боковой трубки и сечения всех отверстий в боковой трубке, диапазоны эффективной работы распределителей.
3. Технические решения по совершенствованию конструкций распределителей дисперсной фазы и перераспределителей жидкости в насадочных экстракционных аппаратах.
4. Методика оценки эффективности распределения сплошной и дисперсной фаз в экстракционных аппаратах с применением методов вычислительной гидродинамики.
5. Результаты численных исследований по определению наиболее оптимальной конструкции перераспределителей жидкости на примере экстракционной колонны демеркаптанализации СУГ.

#### **Степень достоверности и апробация результатов работы**

Достоверность результатов обеспечивается использованием основных физических закономерностей, применением известных специализированных средств CFD-моделирования, а также высокой воспроизводимостью полученных экспериментальных и расчетных данных.

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих научных конференциях: IV, VII Международная научно-практическая конференция «Булатовские чтения», Краснодар, 2020 г., 2023 г.; VI Международная научная конференции «Теория и практика массообменных процессов химической технологии» (Марушкинские чтения), 2021 г; Международная научно-практическая конференция, посвященная 90-летию начала добычи первой башкирской нефти, 2022 г; III Международная научно-практическая

конференция «Актуальные проблемы и направления развития технологий органического и неорганического синтеза в условиях импортозамещения», Стерлитамак, 2023 г.

### Публикации

По материалам диссертации опубликовано 22 работы, в том числе: 5 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ, включая 2 статьи в научном журнале, входящем в международную базу Scopus, 1 патент на изобретение, 1 патент на полезную модель, 3 свидетельства о регистрации программ на ЭВМ, 1 учебное пособие, 11 материалов научно-технических конференций.

### Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 167 наименований. Работа изложена на 204 страницах, содержит 53 таблицы и 79 рисунков.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, обозначены её научная и практическая значимость, сформулированы основные цели и задачи исследований.

**В первой главе** проанализированы различные конструкции распределительных устройств, применяемые в экстракционных колоннах. Обобщены основные принципы проектирования распределителей сплошной и дисперсной фаз, перераспределителей жидкости. Представлены экспериментальные и расчетные методы оценки равномерности распределения потоков в аппаратах колонного типа. В ходе проведенного анализа определены перспективные направления исследования распределительных и перераспределительных устройств, связанные с обеспечением эффективного распределения фаз в экстракционных аппаратах.

**Во второй главе** рассмотрены экспериментальные и расчетные методы исследования.

Оценка эффективности распределения дисперсной фазы проводилась методом CFD-анализа в ANSYS FLUENT в нестационарной постановке, двухфазная система описывалась методом Volume of Fluid. Для подтверждения адекватности модели на системах «вода-масло» и «вода-бензин» были проведены эксперименты по истечению дисперсной фазы из отверстия. Результатом исследований являлись зависимости времени образования капель от подачи дисперсной фазы.

Методом исследования при оценке эффективности работы перераспределителей жидкости в экстракционных аппаратах являлся CFD-анализ, проводимый в среде ANSYS CFX. Гидродинамика двухфазных течений описывалась методом Eulerian-Lagrangian, который учитывает взаимодействие частиц дисперсной фазы заданного диаметра со сплошной фазой.

Предложена методика оценки эффективности распределения сплошной и дисперсной фазы в колонном аппарате, основанная на расчете трех показателей:

1) интенсивность обратного перемешивания сплошной фазы  $I_{BM}$ :

$$I_{BM} = \frac{\iint_{S_N} |U_N| dS - \iint_{S_N} U_N dS}{\iint_{S_N} |U_N| dS + \iint_{S_N} U_N dS} \quad (1)$$

где  $U_N$  – нормальная составляющая вектора скорости сплошной фазы;

$S_N$  – заданное сечение аппарата, перпендикулярное к нормали.

2) функция эффективности распределения сплошной фазы  $\Phi(U)$ :

$$\Phi(U) = \frac{1}{1 + v_U} \quad (2)$$

$$v_U = \left[ \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{S_N} (U_{Ni} - \bar{U}_N)^2} \right] / \bar{U}_N \quad (3)$$

$$\bar{U}_N = \frac{1}{n} \sum_{S_N} U_{Ni} \quad (4)$$

где  $v_U$  – коэффициент вариации нормальной составляющей вектора скорости сплошной фазы;  
 $\bar{U}_N$  – среднее значение нормальной составляющей скорости  $U_{Ni}$  в сечении  $S_N$ .  
 $n$  – число точек в выбранном сечении  $S_N$ .

3) функция эффективности распределения дисперсной фазы  $\Phi(\varphi)$ :

$$\Phi(\varphi) = \frac{1}{1 + v_\varphi} \quad (5)$$

$$v_\varphi = \left[ \sqrt{\frac{1}{S_N} \iint_{S_N} (\varphi - \bar{\varphi})^2 dS} \right] / \bar{\varphi} \quad (6)$$

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{S_N} \iint_{S_N} \varphi dS \quad (7)$$

где  $v_\varphi$  – коэффициент вариации объемной доли дисперсной фазы;  
 $\bar{\varphi}$  – среднее значение объемной доли дисперсной фазы в сечении  $S_N$ .

Разработанная методика включает в себя следующую последовательность действий:

#### ***I. Для перераспределителей жидкости:***

1) выбираются два поперечных сечения аппарата  $S_{XY,1}$ ,  $S_{XY,2}$ , находящиеся над и под перераспределительным устройством;

2) в ходе CFD-расчета определяются векторное поле скорости сплошной фазы  $\vec{U}(x, y, z)$  и скалярное поле объемной доли дисперсной фазы  $\varphi(x, y, z)$  в пределах расчетной области;

3) для заданных сечений аппарата  $S_{XY,1}$ ,  $S_{XY,2}$  вычисляются интенсивность обратного перемешивания  $I_{BM}$  (формула 1), функция эффективности распределения сплошной фазы  $\Phi(U)$  (формулы 2-4); функция эффективности распределения дисперсной фазы  $\Phi(\varphi)$  (формулы 5-7);

4) пункты 2 и 3 последовательно выполняются для каждой рассматриваемой конструкции перераспределителя жидкости;

5) принимается решение по выбору наиболее эффективной конструкции перераспределителя: наилучшее распределение сплошной и дисперсной фаз обеспечивается при минимальном значении  $I_{BM}$  и максимальных значениях  $\Phi(U)$  и  $\Phi(\varphi)$ .

#### ***II. Для распределителей легкой/тяжелой дисперсной фазы:***

1) выбирается поперечное сечение аппарата  $S_{XY}$ , находящееся над/под распределителем;

2) в ходе CFD-расчета определяется скалярное поле объемной доли дисперсной фазы  $\varphi(x, y, z)$  в пределах расчетной области;

3) для заданного сечения аппарата  $S_{XY}$  вычисляется функция эффективности распределения дисперсной фазы  $\Phi(\varphi)$  по формулам 5-7;

4) пункты 2 и 3 последовательно выполняются для каждой рассматриваемой конструкции распределителя дисперсной фазы;

5) принимается решение по выбору наиболее эффективной конструкции распределителя дисперсной фазы: наилучшее распределение обеспечивается при максимальном значении  $\Phi(\varphi)$ .

**Третья глава** посвящена исследованию и совершенствованию конструктивного оформления трубчатых распределителей, а также анализу различных факторов, влияющих на эффективность распределения дисперсной фазы.

На первом этапе были проведены исследования по истечению дисперсной фазы. На системах «вода-масло» и «вода-бензин» при различной подаче нефтепродуктов получены данные по времени образования капель дисперсной фазы при истечении в водную фазу из латунной трубки диаметром 4x0,5 мм. На втором этапе была разработана модель истечения дисперсной фазы в среде ANSYS FLUENT. Для проверки адекватности CFD-модели отслеживалась объемная доля дисперсной фазы в элементарном объеме, находящимся на оси отверстия на 5 см выше него. Зависимости объемной доли масла в элементарном объеме от времени при подаче масла 0,228 мл/с и 0,493 мл/с представлены на рисунке 1. Каждый пик на графике соответствует отдельной капле, прошедшей вдоль элемента сетки. Данные, полученные в ходе эксперимента и расчета, а также результаты статистической обработки данных приведены в таблице 1.

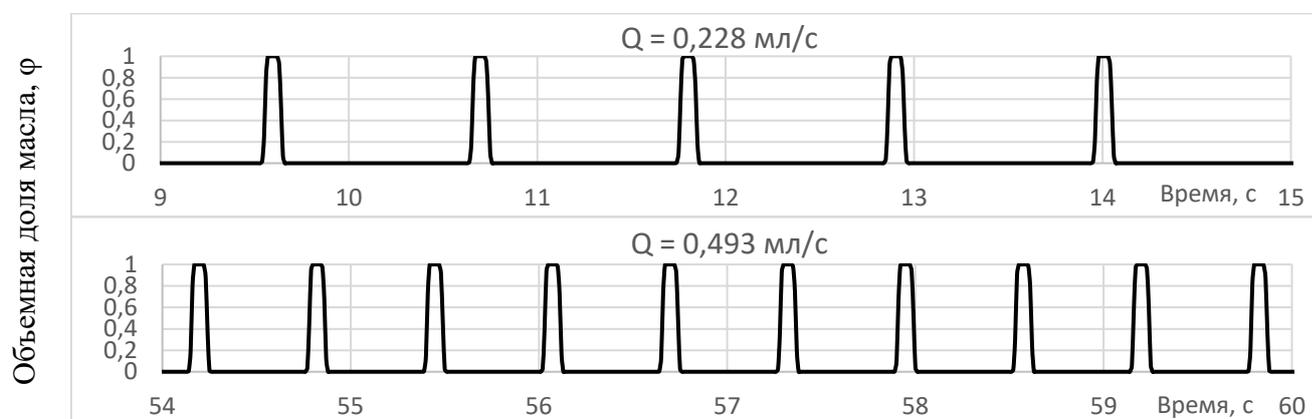


Рисунок 1 – Зависимость объемной доли масла  $\varphi$  в заданном элементе сетки от времени

Таблица 1 – Данные по времени образования капли согласно экспериментам и расчету, результаты статистической обработки данных

Результаты экспериментов и расчетов			Результаты статистической обработки				
Подача масла / бензина, мл/с	Время образования капли масла согласно опытам, с	Время образования капли по расчету, с	Относительная погрешность расчета, %	Оценка воспроизводимости экспериментов по критерию Кохрена		Оценка адекватности модели по критерию Фишера	
				$G$	$G_{\text{табл}}$	$F$	$F_{\text{табл}}$
Система «вода-масло»							
0,228	1,104	1,103	0,1	0,471	0,561	1,98	2,95
0,336	0,830	0,833	0,4				
0,435	0,691	0,686	0,7				
0,472	0,639	0,643	0,6				
0,493	0,617	0,620	0,5				
0,595	0,545	0,536	1,7				
0,617	0,517	0,519	0,4				
Система «вода-бензин»							
0,270	0,573	0,565	0,4	0,580	0,616	2,73	3,11
0,323	0,459	0,463	0,9				
0,476	0,336	0,340	1,2				
0,685	0,238	0,247	3,8				
0,926	0,170	0,174	2,4				
1,250	0,141	0,147	4,3				

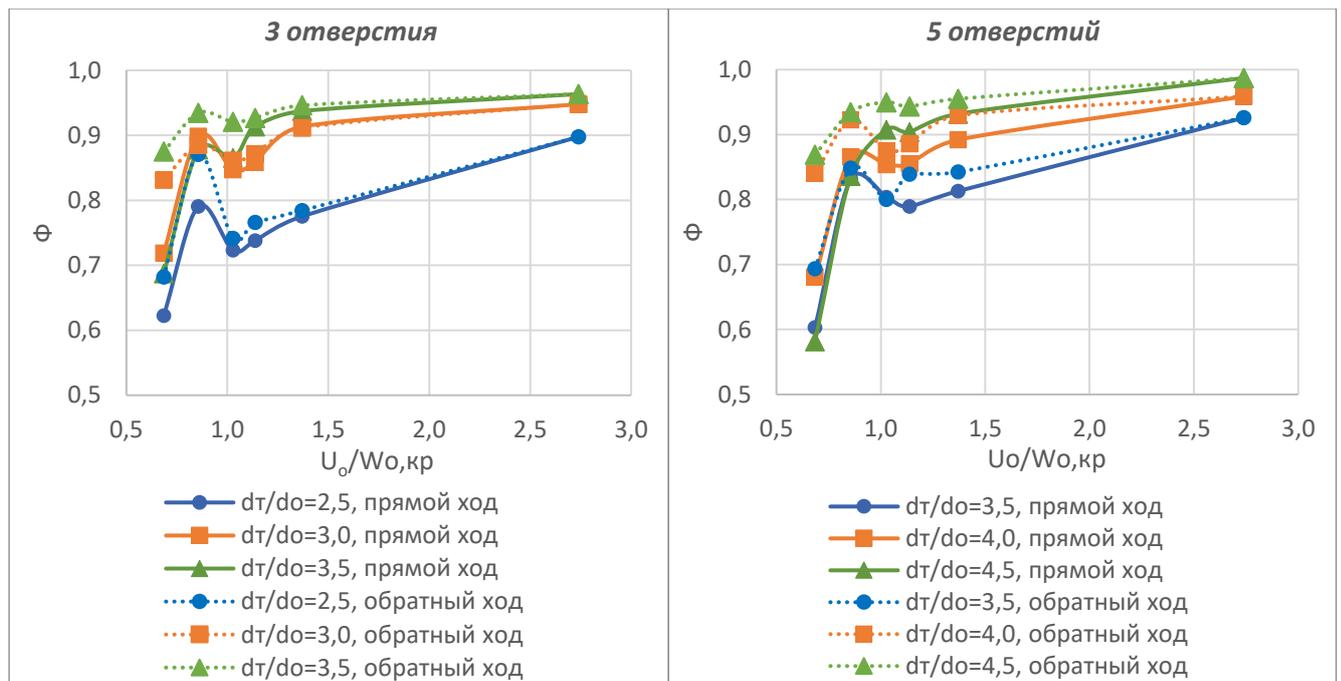
Невязка расчетных и экспериментальных значений времени образования капли для систем «вода-масло» и «вода-бензин» составила не более 1,7 % и 4,3 % соответственно. Методами дисперсионного анализа подтверждена воспроизводимость результатов экспериментов ( $G < G_{\text{табл}}$ ), а также подтверждена адекватность CFD-модели ( $F < F_{\text{табл}}$ ) при значениях критериев Рейнольдса в отверстии от 4 до 965.

В соответствии с разработанной моделью на системе «вода-масло» была исследована гидродинамика потока дисперсной фазы в боковых трубках трубчатых распределителей. Исследованы конструкции трубок с 2, 3, 4, 5 и 6 отверстиями диаметром  $d_o = 4$  мм, шагом между отверстиями  $X_o = 40$  мм при различном диаметре боковых трубок  $d_T$  и различной подаче масла  $M$ . Расчет проводился путем последовательного увеличения подачи (прямой ход) с последующим снижением (обратный ход). Эффективность распределения оценивалась как отношение усредненных минимальных и максимальных расходов масла, выходящего из каждого отверстия:

$$\Phi = \frac{\min(\overline{M}_j)}{\max(\overline{M}_j)} \quad (8)$$

Большим значениям  $\Phi$  соответствует лучшее распределение потока.

Зависимости показателя эффективности распределения от приведенной средней скорости дисперсной фазы в отверстии  $U_o/W_{o,кр}$  показаны на рисунке 2:



$W_{o,кр} = 0,137$  м/с – критическая скорость истечения, соответствующая переходу из капельного режима в струйный

Рисунок 2 – Зависимости показателя эффективности распределения от приведенной средней скорости дисперсной фазы в отверстии  $U_o/W_{o,кр}$  при различном соотношении  $d_T/d_o$

Анализ возникающего профиля давлений в распределительной трубке привел к синтезу аналитической модели распределения потока:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{x_1^2 - x_2^2}{\sum_{i=2}^N x_i} = \frac{x_2^2 - x_3^2}{\sum_{i=3}^N x_i} = \dots = \frac{x_{N-1}^2 - x_N^2}{x_N} = 50,26 \cdot \frac{X_o \mu_a}{Q \rho_a (1 + \xi_o) \left(\frac{d_T}{d_o}\right)^4} \\ \sum_{i=1}^N x_i = 1 \end{array} \right. \quad (9)$$

где  $x_i$  – доля потока, выходящего из  $i$ -ого отверстия в трубке, имеющей  $N$  отверстий;  
 $\xi_o$  – коэффициент местного сопротивления при истечении из отверстия;  
 $Q$  – объёмный расход потока, поступающего в трубку,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  
 $\mu_d$  – динамическая вязкость потока,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  
 $\rho_d$  – плотность потока,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

По результатам анализа CFD-модели и аналитической модели выявлено, что:

- при струйном режиме истечения увеличение подачи дисперсной фазы и соотношения диаметра трубки и отверстий приводит к увеличению эффективности распределения;
- при одинаковой объемной подаче поток с большей плотностью распределяется более равномерно;
- увеличение шага между отверстиями, а также высокая вязкость подаваемой среды приводят к увеличению потерь на трение в трубке, что негативно сказывается на распределении;
- в области подач дисперсной фазы, соответствующих переходу из капельного режима истечения в струйный, равномерность распределения дисперсной фазы несколько снижается;
- при низких скоростях дисперсной фазы в трубке наблюдается неполное вытеснение сплошной фазы, что приводит к нарушению равномерности распределения (см. рисунок 3). Кратковременное увеличение подачи дисперсной фазы (прямой ход) с переходом в развитый струйный режим и последующий возврат к прежней подаче (обратный ход) способствует повышению эффективности распределения за счет более полного вытеснения сплошной фазы из трубки и снижения местного сопротивления при прохождении дисперсной фазы через крайние отверстия (см. рисунок 4).

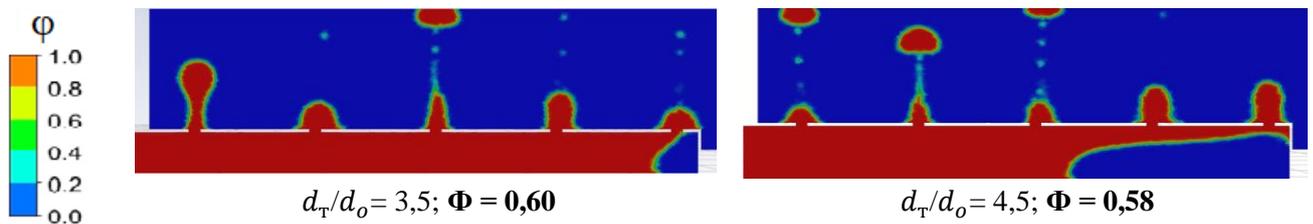


Рисунок 3 – Распределение объемной доли масла  $\phi$  в трубке с 5 отверстиями при капельном режиме истечения ( $U_o/W_{o,кр} = 0,69$ )

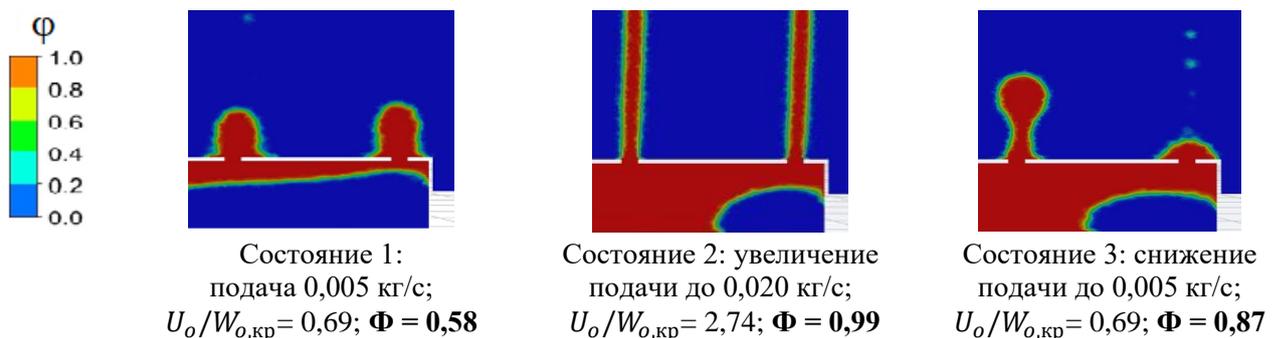


Рисунок 4 – Распределение дисперсной фазы у крайнего отверстия в трубке с 5 отверстиями, при различных режимах работы ( $d_T/d_o = 4,5$ )

Определены условия, при которых кратковременный переход в развитый струйный режим с последующим возвратом в рабочий режим позволяет увеличить эффективность распределения дисперсной фазы (условие  $\Phi_{обр}/\Phi_{прям} > 1,05$ ):

$$\text{Fr}_o \leq \left(\frac{d_T}{d_o}\right)^{3/4} \quad (10)$$

$$\text{Fr}_o = \frac{[U_o]^2}{gd_o} \cdot \frac{\rho_d}{\Delta\rho} \quad (11)$$

где  $\text{Fr}_o$  – модифицированный критерий Фруда для отверстия;

$\rho_d$  – плотность дисперсной фазы, кг/м<sup>3</sup>;

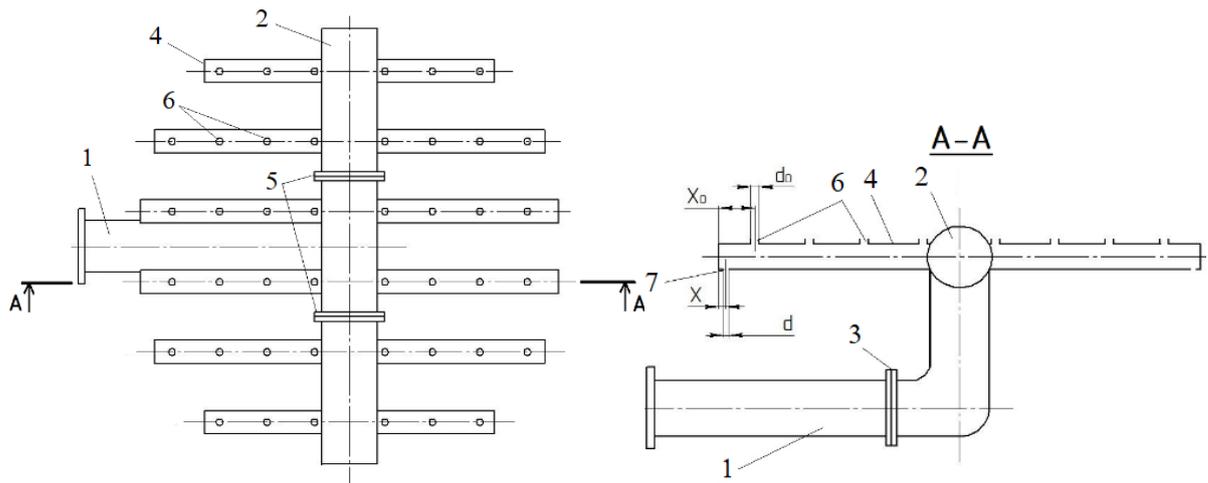
$\Delta\rho$  – разность плотностей сплошной и дисперсной фаз, кг/м<sup>3</sup>.

Потенциальная возможность улучшения равномерности распределения дисперсной фазы в распределителе определяется средней скоростью истечения в отверстиях:

$$U_o \leq \sqrt{gd_o \frac{\Delta\rho}{\rho_d} \cdot \left(\frac{d_T}{d_o}\right)^{3/8}} \quad (12)$$

При выполнении условия 12 для повышения эффективности распределения дисперсной фазы рекомендован кратковременный переход в развитый струйный режим с последующим возвратом в рабочий режим. В противном случае кратковременная корректировка режима не требуется, поскольку увеличение эффективности распределения будет незначительным.

С целью обеспечения равномерного распределения в условиях низкой нагрузки по дисперсной фазе и расширения диапазона эффективной работы предложена усовершенствованная конструкция трубчатого распределителя, изображенная на рисунке 5:



1 – питательная труба, 2 – центральная труба, 3 – фланец, 4 – боковые распределительные трубки,

5 – фланцы, 6 – отверстия для выхода дисперсной фазы, 7 – малое отверстие

Рисунок 5 – Предлагаемая конструкция распределителя дисперсной фазы

Предлагаемая конструкция имеет дополнительные отверстия 7 для отвода сплошной фазы, что позволяет снизить местное сопротивление при прохождении дисперсной фазы через крайние отверстия и увеличить эффективность распределения. На рисунке 6 приведены зависимости эффективности распределения  $\Phi$  от приведенной средней скорости дисперсной фазы в отверстии  $U_o/W_{o,кр}$  для типовой и предлагаемой конструкций трубок.

Анализ показал, что в диапазоне скоростей дисперсной фазы  $U_o/W_{o,кр} = 0,69 - 2,74$  предлагаемая конструкция распределителя обеспечивает повышение среднего показателя эффективности распределения на 3,6 – 31,4 % по сравнению с типовой конструкцией. Наибольший прирост эффективности распределения наблюдается при большом числе отверстий и большом диаметре трубок, когда возникают низкие скорости движения потока в трубке.

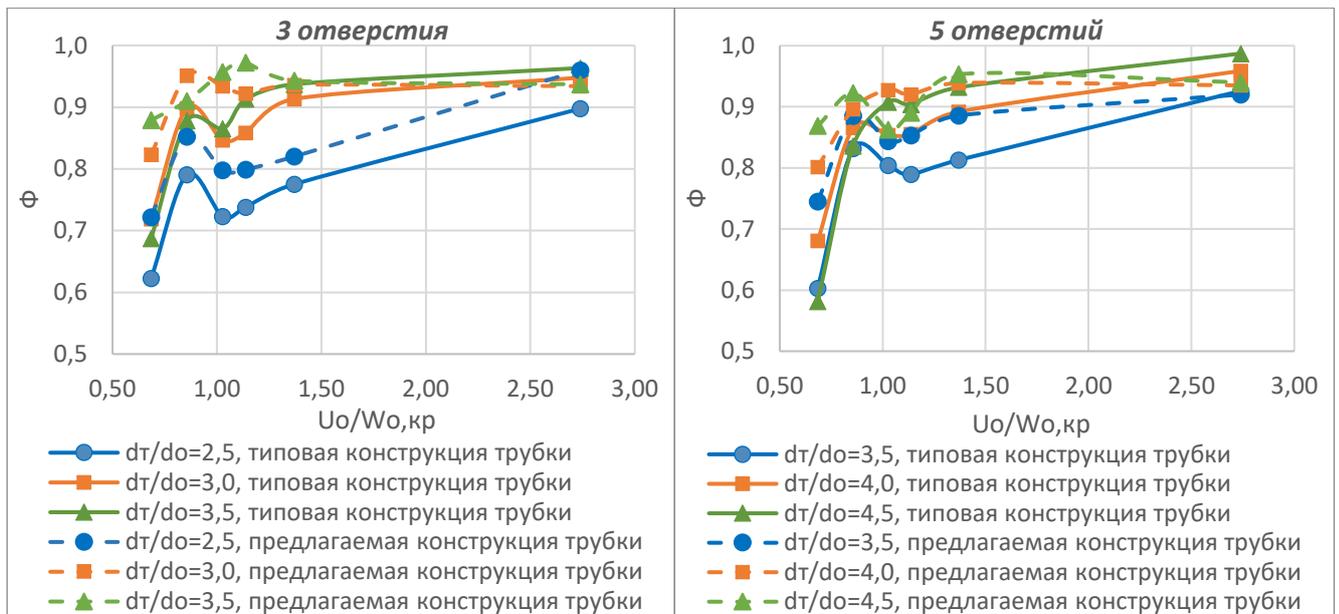


Рисунок 6 – Зависимости эффективности распределения  $\Phi$  от приведенной средней скорости дисперсной фазы в отверстиях  $U_o/W_{o,кр}$  для типовой и предлагаемой конструкций распределителей

Для рассмотренных конструкций распределителей были определены требуемое соотношение диаметров боковых трубок и отверстий  $d_T/d_o$ , а также требуемое отношение поперечного сечения боковой трубки и сечения всех отверстий в ней  $S_T/\sum S_o$ , достаточное для обеспечения эффективного распределения дисперсной фазы ( $\Phi > 0,90$ ). Результаты расчетного анализа представлены в таблице 2:

Таблица 2 – Расчетные значения  $d_T/d_o$  и  $S_T/\sum S_o$  для типовой и предлагаемой конструкции трубок, обеспечивающие эффективное распределение дисперсной фазы

Режим истечения	Типовая конструкция трубок		Предлагаемая конструкция трубок	
	$d_T/d_o$	$S_T/\sum S_o$	$d_T/d_o$	$S_T/\sum S_o$
Капельный режим ( $U_o/W_{o,кр} = 0,68$ )	эффективность не достигается		$2,19\sqrt{N} - 0,30$	4,80
Струйный режим ( $U_o/W_{o,кр} = 1,14$ )	$2,16\sqrt{N} - 0,48$ $N \leq 5$	3,78 для $N = 5$	$1,95\sqrt{N} - 0,46$	3,80

Таким образом, трубчатые распределители целесообразно проектировать таким образом, чтобы площадь поперечного сечения всех отверстий составляла 26-28 % от площади поперечного сечения боковой трубки, в этом случае будет достигнуто эффективное распределение потока в струйном режиме при оптимальной скорости истечения. Предлагаемая конструкция трубок позволяет эффективно распределить поток и в капельном режиме истечения при  $S_T/\sum S_o = 4,8$ .

Для типовой и предлагаемой конструкции распределителей были определены пределы изменения нагрузок по дисперсной фазе, при которых эффективность распределения  $\Phi \geq 0,90$ . Величина диапазона изменения нагрузок (turndown ratio) вычислялась по формуле:

$$TR = \frac{U_{o,max}}{U_{o,min}} = \frac{0,38}{U_{o,min}} \quad (13)$$

где  $U_{o,max} = 0,38$  м/с – максимальная рекомендуемая скорость дисперсной фазы в отверстиях.

Зависимость диапазона эффективной работы от отношения  $S_T/\sum S_o$  приведена рисунке 7:

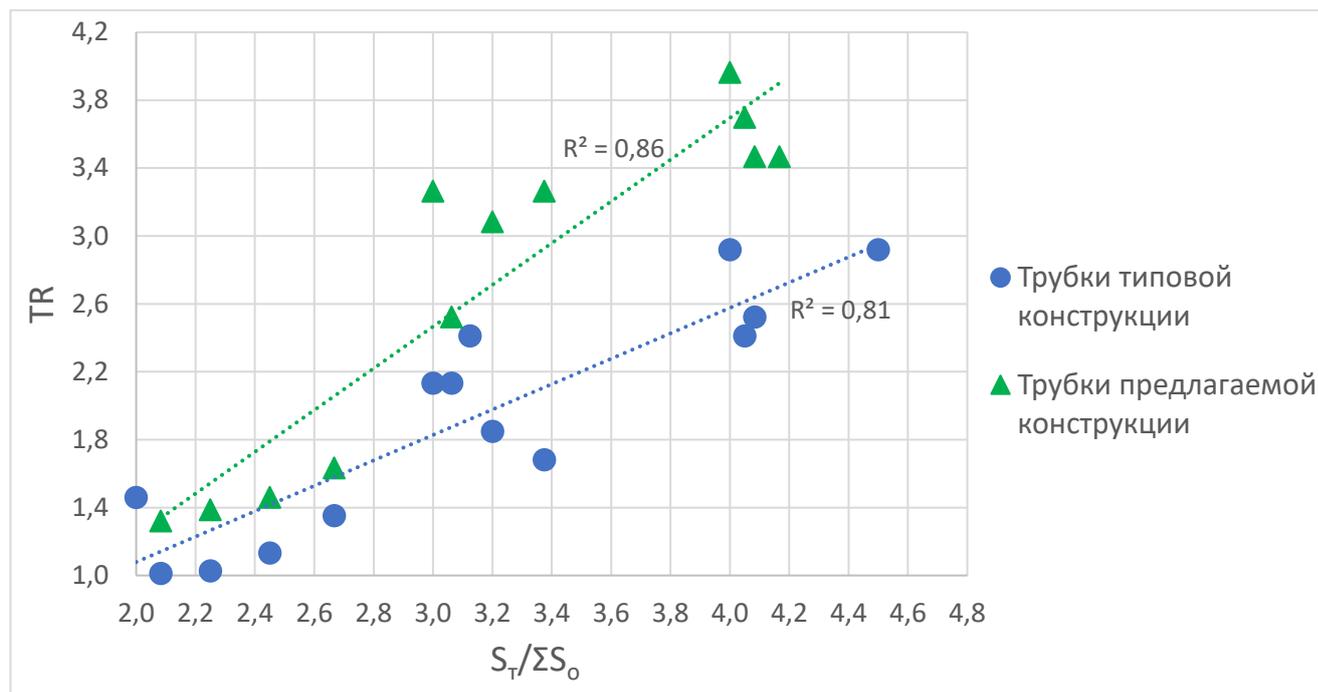


Рисунок 7 – Зависимость диапазона эффективной работы распределителя от отношения  $S_T/\sum S_o$

При рекомендуемых для проектирования соотношениях  $S_T/\sum S_o = 3,5 - 4,0$  для систем «жидкость-жидкость» определены диапазоны эффективной работы трубчатых распределителей:

- для распределителей типовой конструкции:  $TR = 2,2 - 2,6$ ;
- для распределителей предлагаемой конструкции:  $TR = 3,1 - 3,7$ .

Таким образом, по сравнению с типовой конструкцией распределителя, предлагаемая конструкция позволяет расширить диапазон эффективной работы в среднем на 41 %.

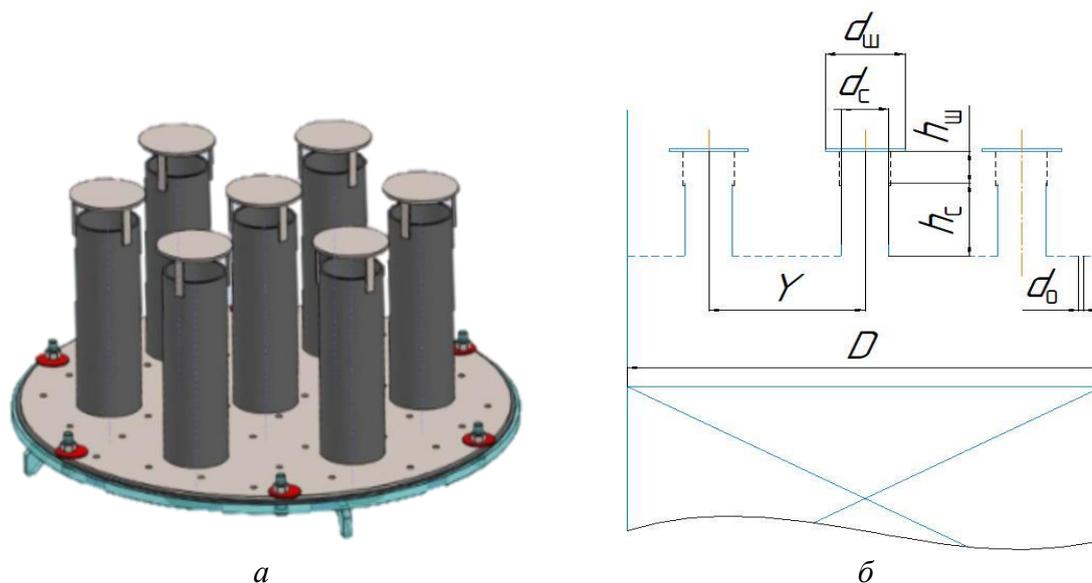
**Четвёртая глава** посвящена исследованию и совершенствованию конструктивного оформления перераспределителей жидкости. Для оценки применимости CFD-модели в среде ANSYS CFX было проведено расчетное исследование процессов истечения воды через отверстия перераспределительных тарелок (52 отверстия диаметром 6 мм), погруженных в две разные среды: воздух и бензин. Полученные данные были сопоставлены со справочными данными по коэффициентам расхода  $\alpha$ . Результаты расчетов обобщены в таблице 3:

Таблица 3 – Значения коэффициентов расхода  $\alpha$  при истечении воды из отверстий перераспределительной тарелки, диаметр отверстий 6 мм

Расход воды, кг/с	Re	Справочные данные	Расчет на системе «вода-воздух»		Расчет на системе «вода-бензин»	
		$\alpha_{справ}$	$\alpha_{расч}$	Отн. погрешность, %	$\alpha_{расч}$	Отн. погрешность, %
0,247	1000	0,692	0,747	7,9	0,714	3,1
0,574	2320	0,680	0,705	3,7	0,663	2,5
0,693	2800	0,678	0,692	2,1	0,661	2,5
0,841	3400	0,675	0,667	1,2	0,656	2,5
1,064	4300	0,672	0,667	0,8	0,677	0,7
1,237	5000	0,667	0,664	0,5	-	-
1,584	6400	0,665	0,666	0,1	-	-
1,807	7300	0,662	0,678	2,4	-	-

Справочные значения коэффициентов расхода и значения, полученные в ходе гидродинамического расчета, для систем «вода-воздух» и «вода-бензин» отличаются не более, чем на 7,9 % и 3,1 % соответственно. Установлено, что разработанная модель адекватно описывает процессы распределения дисперсной водной фазы при её факторной скорости в отверстиях  $U_o \sqrt{\rho_d / \Delta \rho} = 0,2 - 1,3$  м/с.

Объектом расчетного анализа и оптимизации являлись конструкции перераспределительных тарелок для диспергирования тяжелой фазы в колонне демеркаптанзации СУГ. 3D-модель и схема перераспределительной тарелки изображена на рисунке 8:



а – 3D-модель перераспределительной тарелки, б – схема перераспределительной тарелки;  
 $D$  – диаметр колонны,  $d_o$  – диаметр отверстий,  $Y$  – шаг между патрубками для прохода сплошной фазы,  
 $h_c$  – высота патрубков,  $d_c$  – диаметр патрубков,  $h_{ш}$  – высота поднятия шляпки,  $d_{ш}$  – диаметр шляпки  
 Рисунок 8 – Схема перераспределительной тарелки с указанием основных размеров

Расчетное исследование конструкций перераспределительных тарелок проводилось при заданных расходах жидких фаз:

- расход сплошной фазы (СУГ) – 1,36 кг/с (9,7 м<sup>3</sup>/ч);
- расход дисперсной фазы (раствор NaOH) – 0,41 кг/с (1,4 м<sup>3</sup>/ч).

На первом этапе исследовалось влияние количества отверстий и взаимного расположения патрубков и отверстий. Диаметр капель дисперсной фазы был определен в соответствии с методикой, описанной в Главе 1 диссертации, и составил 8,4 – 8,8 мм. Распределение дисперсной фазы оценивалось на расстоянии 300 мм под перераспределительной тарелкой (функция  $\Phi(\varphi)$ ). Распределение сплошной фазы оценивалось на расстоянии 500 мм над перераспределительной тарелкой (функция  $\Phi_1(U)$ ), а также на расстоянии 300 мм под перераспределительной тарелкой (функция  $\Phi_2(U)$ ). Во всех случаях шляпка отсутствовала. В таблице 4 представлены различные варианты перераспределителей жидкости и результаты расчетов по распределению сплошной и дисперсной фаз.

Распределение объёмной доли дисперсной фазы в сечении, расположенном на расстоянии 300 мм под полотном перераспределительной тарелки, показано на рисунке 9. Поля скоростей сплошной фазы для представленных вариантов показаны на рисунке 10:

Таблица 4 – Конфигурация перераспределительных тарелок, расчетные скорости фаз и показатели их распределения для различных вариантов

Показатель	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Конструктивные параметры:			
Диаметр отверстий $d_o$ , мм	8		
Количество отверстий $N_o$	33	40	44
Диаметр патрубков $d_c$ , мм	60	85	70
Количество патрубков $N_c$	12	5	7
Показатели распределения сплошной фазы:			
$I_{BM}$ для сплошной фазы (500 мм над тарелкой)	0,39	0,37	0,29
$I_{BM}$ для сплошной фазы (300 мм под тарелкой)	0,72	0,64	0,63
$\Phi_1(U)$ для сплошной фазы (500 мм над тарелкой)	0,28	0,29	0,32
$\Phi_2(U)$ для сплошной фазы (300 мм под тарелкой)	0,12	0,16	0,17
Показатель распределения дисперсной фазы:			
$\Phi(\varphi)$ для дисперсной фазы (300 мм под тарелкой)	0,55	0,57	0,60

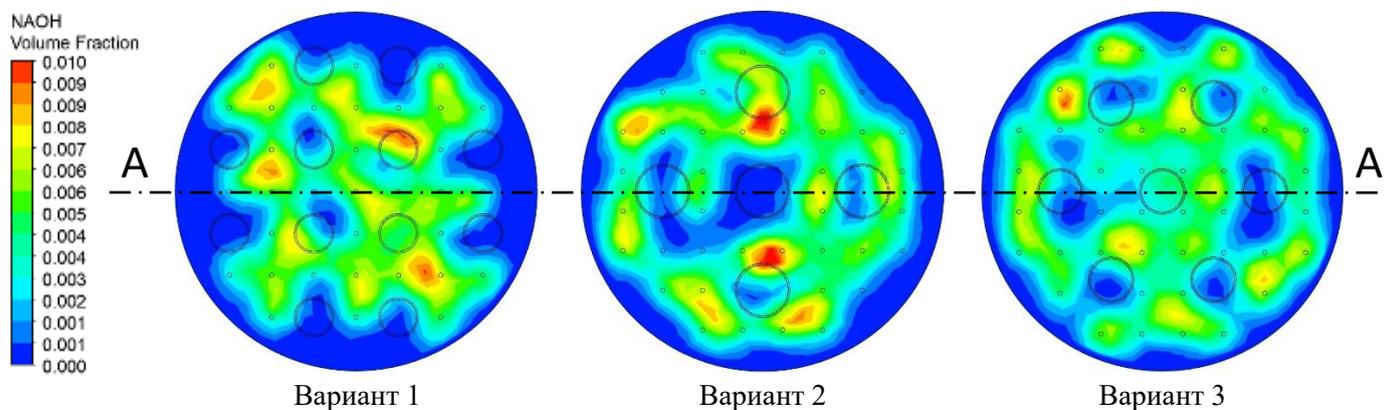


Рисунок 9 – Распределение объемной доли дисперсной фазы в горизонтальном сечении, расположенном в 300 мм под полотном перераспределительной тарелки

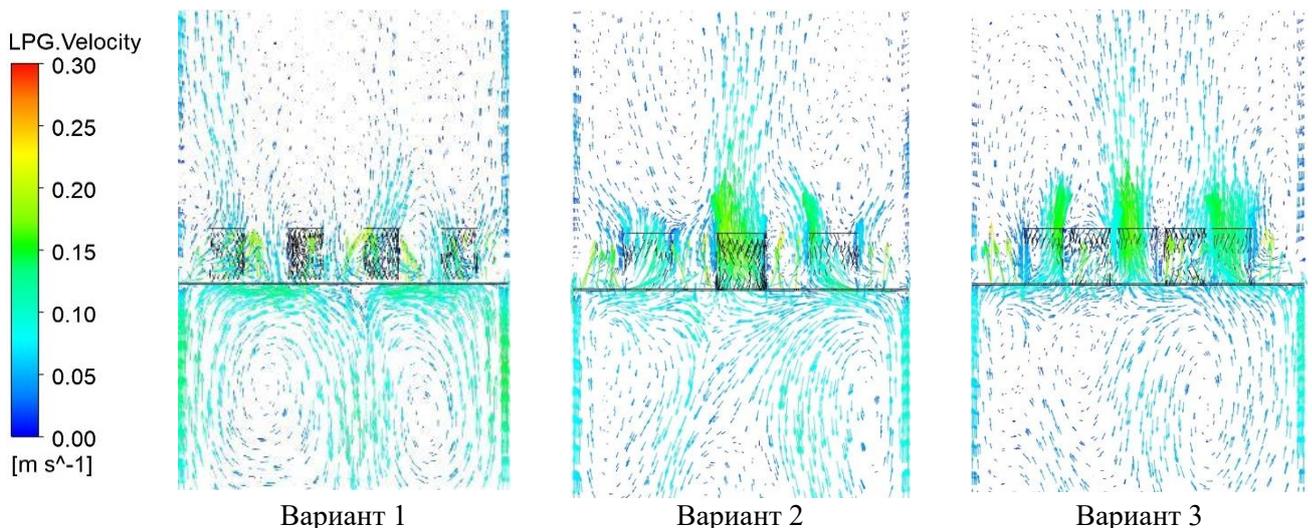


Рисунок 10 – Поля скорости сплошной фазы в сечении А-А

Анализируя полученные данные, были сделаны следующие выводы:

1) равномерное расположение большего числа отверстий в полотне способствует равномерному распределению дисперсной фазы по сечению колонны;

2) перераспределительную тарелку рекомендуется проектировать таким образом, чтобы каждый патрубок со всех сторон был окружен отверстиями. Как показывают расчеты, такой подход благоприятно сказывается на распределении как дисперсной, так и сплошной фазы.

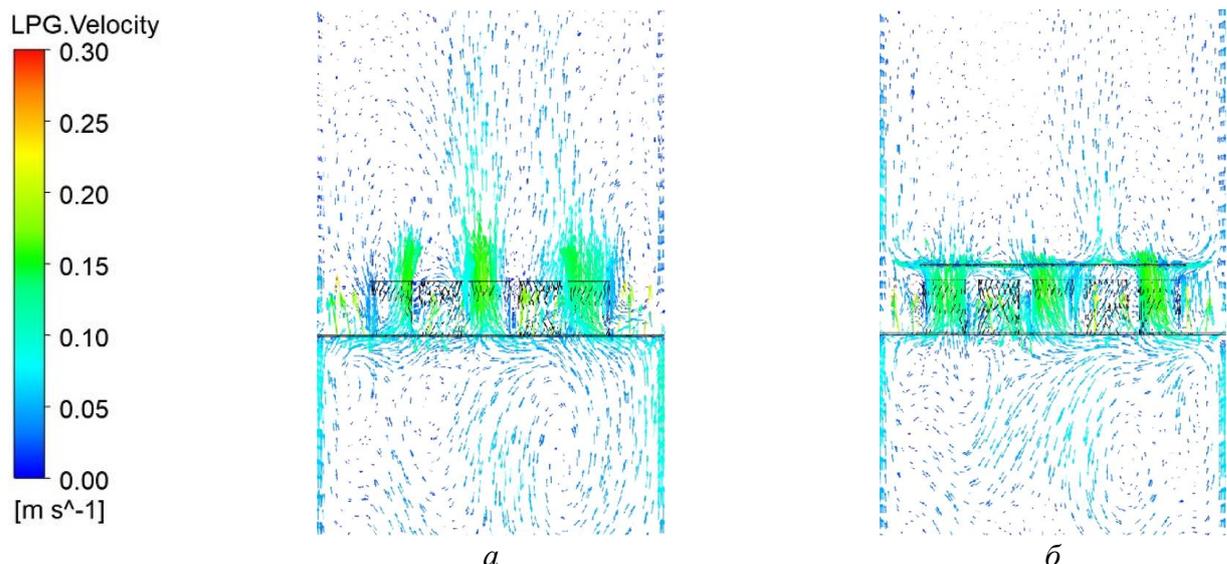
На втором этапе исследовалось влияние на эффективность распределения наличия/отсутствия шляпки над патрубками, а также конфигурации шляпки. Для протекания процесса массообмена решающее значение имеет равномерность распределения потоков на входе в насадку, то есть на выходе из перераспределителя. В связи с этим, приоритетными показателями, определяющими распределение сплошной и дисперсной фаз, являлись:

- функция эффективности распределения сплошной фазы над перераспределительной тарелкой  $\Phi_1(U)$ ;
- функция эффективности распределения дисперсной фазы под перераспределительной тарелкой  $\Phi(\varphi)$ .

Результаты расчетов показателей распределения для данных конструкций приведены в таблице 5. Векторные поля скорости сплошной фазы для конструкций перераспределительных тарелок без шляпок и со шляпками приведены на рисунке 11.

Таблица 5 – Данные по конфигурации перераспределительных тарелок и показатели распределения сплошной фазы

Показатель / № варианта	а	б
Конструктивные параметры:		
Диаметр отверстий $d_o$ , мм	8	
Количество отверстий $N_o$	44	
Диаметр патрубков $d_c$ , мм	70	
Количество патрубков $N_c$	7	
Отношение шага между патрубками к диаметру колонны $Y/D$	0,31	0,31
Отношение диаметра шляпки к диаметру патрубка $d_{ш}/d_c$	-	1,29
Отношение высоты поднятия шляпки к диаметру патрубка $h_{ш}/d_c$	-	0,36
Показатели распределения фаз:		
$\Phi_1(U)$ для сплошной фазы (500 мм над тарелкой)	0,321	0,361
$\Phi(\varphi)$ для дисперсной фазы (300 мм под тарелкой)	0,600	0,607



а – патрубки без шляпки,  $Y/D = 0,31$ ; б – патрубки со шляпкой,  $Y/D = 0,31$ ,  $d_{ш}/d_c = 1,29$ ,  $h_{ш}/d_c = 0,36$

Рисунок 11 – Векторные поля скорости сплошной фазы для конфигураций перераспределительных тарелок без шляпок и со шляпками

Расчетный анализ показал, что наличие шляпки способствует равномерному распределению сплошной фазы на выходе из перераспределителя, при этом наблюдается снижение обратного перемешивания как над перераспределительной тарелкой, так и под ней.

Влияние соотношения диаметра шляпки и патрубка  $d_{ш}/d_c$  на распределение сплошной фазы над полотном  $\Phi_1(U)$  и распределение капель дисперсной фазы под полотном  $\Phi(\varphi)$  представлено на рисунке 12. Влияние отношения высоты поднятия шляпки к диаметру патрубка  $h_{ш}/d_c$  на распределение сплошной фазы над перераспределительной тарелкой  $\Phi_1(U)$  и распределение капель дисперсной фазы под полотном  $\Phi(\varphi)$  отражено на рисунке 13.

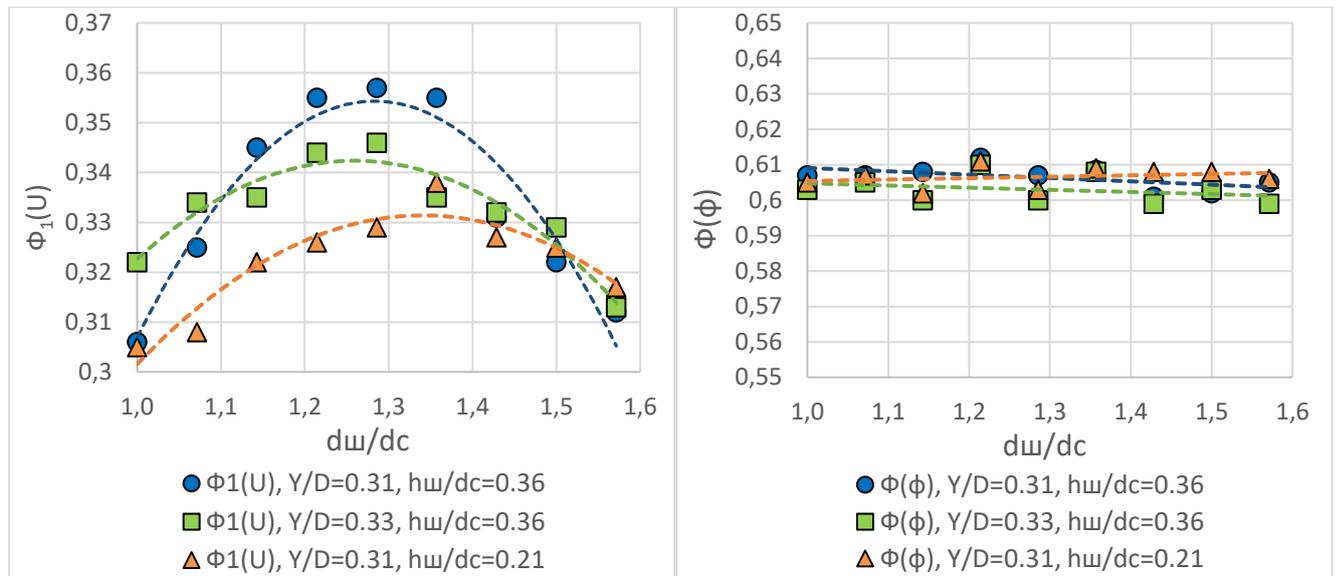


Рисунок 12 – Зависимость функции эффективности распределения сплошной фазы  $\Phi_1(U)$  и функции эффективности распределения дисперсной фазы  $\Phi(\varphi)$  от соотношения диаметров шляпки и патрубков  $d_{ш}/d_c$  при различных соотношениях  $Y/D$  и  $h_{ш}/d_c$

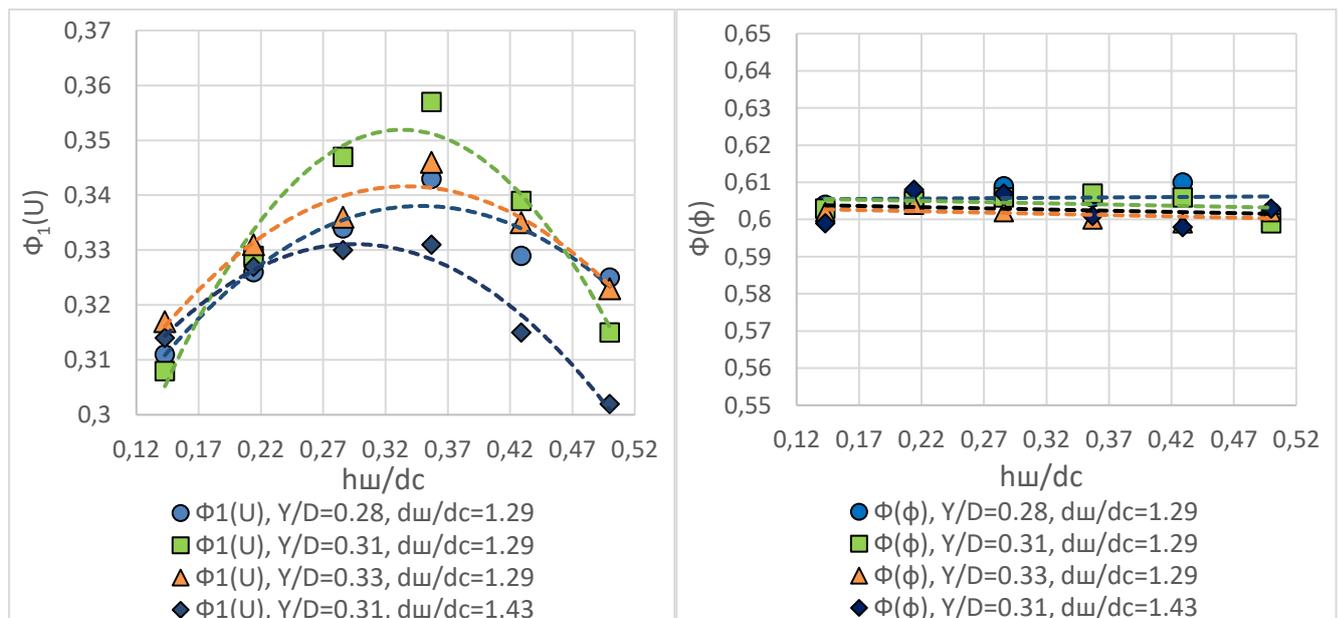


Рисунок 13 – Зависимость функции эффективности распределения сплошной фазы  $\Phi_1(U)$  и функции эффективности распределения дисперсной фазы  $\Phi(\varphi)$  от соотношения высоты поднятия шляпки и диаметра патрубков  $h_{ш}/d_c$  при различных соотношениях  $Y/D$  и  $d_{ш}/d_c$

Расчетный анализ показал, что конструкции перераспределительных тарелок с отношением диаметров шляпки и патрубка  $d_{ш}/d_c=1,25 - 1,35$  и отношением высоты поднятия шляпки к диаметру патрубка  $h_{ш}/d_c = 0,30 - 0,38$  обеспечивают равномерное распределение сплошной фазы над тарелкой. При этом влияние конфигурации шляпки на распределение дисперсной фазы оказалось несущественным.

На третьем этапе исследовалось влияние расстояния между соседними патрубками  $Y/D$  на эффективность распределения фаз. На рисунке 14 показаны зависимости величины  $\Phi_1(U)$  над полотном тарелки и величины  $\Phi(\varphi)$  под полотном тарелки.

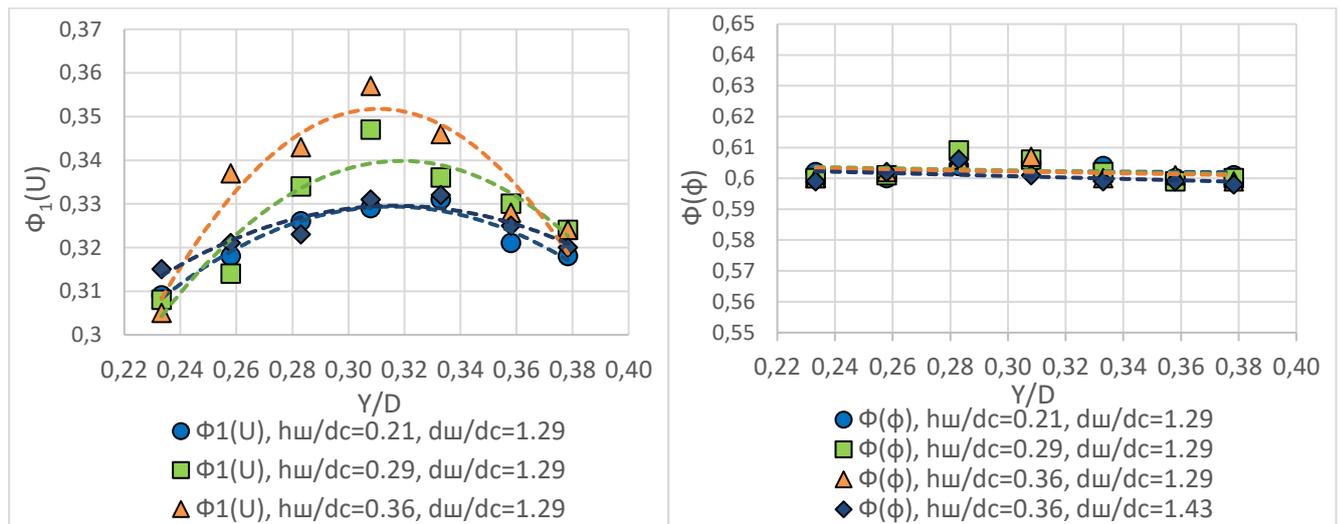


Рисунок 14 – Зависимость функции эффективности распределения сплошной фазы  $\Phi_1(U)$  и функции эффективности распределения дисперсной фазы  $\Phi(\varphi)$  от соотношения  $Y/D$  при различных значениях соотношений  $h_{ш}/d_c$  и  $d_{ш}/d_c$

Максимальная эффективность распределения сплошной фазы над полотном тарелки  $\Phi_1(U)$  наблюдается при отношении  $Y/D = 0,29 - 0,33$ . Увеличение расстояния между патрубками сверх соотношения  $Y/D = 0,33$ , как и уменьшения этого расстояния ниже соотношения  $Y/D = 0,29$  приводит к ухудшению условий распределения сплошной фазы над полотном тарелки. Распределение дисперсной фазы практически не зависит от соотношения  $Y/D$ .

Показано, что с геометрической точки зрения наиболее оптимальное расположение патрубков подразумевает равенство масштабов фронтов потоков, исходящих в сторону соседних патрубков, и фронтов, исходящих в сторону стенок корпуса. Схема фронтов потоков сплошной фазы представлена на рисунке 15 (фронт потока показан пунктирной линией):

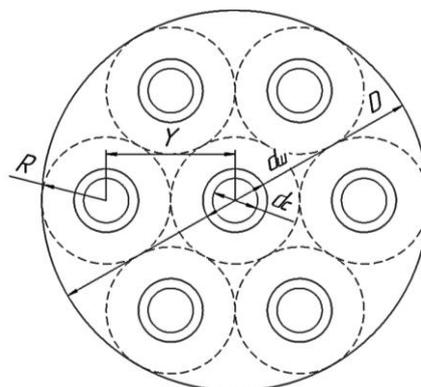


Рисунок 15 – Схема фронтов потоков сплошной фазы, выходящей из патрубков

В соответствии с данной схемой было определено геометрически наиболее оптимальное расположение патрубков:

$$\frac{Y}{D} = \frac{1}{N_{c,r}} \quad (14)$$

где  $N_{c,r}$  – максимальное число патрубков в ряду, для тарелки с 7 патрубками  $N_{c,r} = 3$ .

Формула 14 может быть использована для предварительного определения расстояния между патрубками. Уточненное значение расстояния между патрубками при различном их количестве можно определить по формулам, приведенным в таблице 6. Указанные в таблице количества предполагают наиболее равномерное взаимное расположение патрубков.

Таблица 6 – Формулы для расчета расстояния между центрами патрубков заданного количества

Nc	4	5	7	12	19	21	24	32
Y	D/√5	D/3	D/3	D/√17	D/5	D/√29	D/√37	D/√45
Nc	37	45	52	61	69	77	91	96
Y	D/7	D/√65	D/√73	D/9	D/√97	D/√117	D/11	D/√137

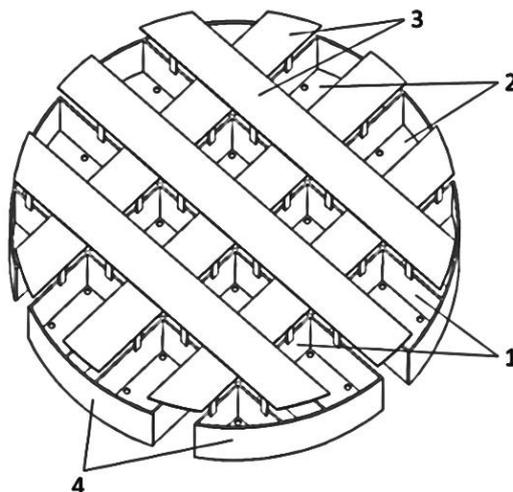
На основе CFD-расчета различных конструкций перераспределительных тарелок разработано уравнение квадратичной регрессии и вычислены коэффициенты регрессии:

$$R = \Phi_1(U) = a_0 + a_1\Gamma_1 + a_{11}\Gamma_1^2 + a_2\Gamma_2 + a_{22}\Gamma_2^2 + a_3\Gamma_3 + a_{33}\Gamma_3^2 + a_{12}\Gamma_1\Gamma_2 + a_{13}\Gamma_1\Gamma_3 + a_{23}\Gamma_2\Gamma_3 \quad (15)$$

В результате оптимизации функции  $R$  вычислены значения симплексов  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$  и  $\Gamma_3$ , при которых достигается наиболее эффективное распределение фаз в аппарате:

$$\Gamma_1 = \frac{d_{\text{ш}}}{d_c} = 1,28; \quad \Gamma_2 = \frac{h_{\text{ш}}}{d_c} = 0,34; \quad \Gamma_3 = \frac{Y}{D} = 0,32.$$

Предложена принципиально новая конструкция перераспределителя жидкости, позволяющая обеспечить равномерное распределение сплошной и дисперсной фаз в условиях высокой удельной нагрузки по сплошной фазе и высокой кратности сплошная фаза / дисперсная фаза. К процессам, в которых наблюдается такое соотношение нагрузок, можно отнести: процессы щелочной демеркаптанзации СУГ, процессы селективной очистки масел фенолом (в нижней части аппарата), процессы деароматизации бензинов. 3D-модель перераспределителя жидкости, предназначенного для диспергирования тяжелой фазы, представлена на рисунке 16:



1 – матрица, 2 – перфорированные пластины, 3 – горизонтальные пластины, 4 – гнутые пластины  
Рисунок 16 – 3D-модель перераспределителя жидкости

Основу предлагаемого перераспределителя составляет матрица, образованная двумя взаимно перпендикулярными приваренными друг к другу рядами вертикальных пластин, создающих каналы для прохождения сплошной фазы. К матрице привариваются перфорированные пластины 2, в которых имеются отверстия для прохода дисперсной фазы. Для лучшего перераспределения сплошной фазы над окнами имеются горизонтальные пластины 3, которые также препятствуют возможному проскоку капель дисперсной фазы через окна для прохода сплошной фазы. Для создания герметичных отсеков для накопления и распределения дисперсной фазы используются гнутые пластины 4. Конструкция устанавливается на опорные кольца, имеющиеся в корпусе аппарата.

Методами CFD-анализа в среде ANSYS CFX проведен расчет предлагаемого перераспределителя и конструкции перераспределительной тарелки, имеющей максимальное сечение для прохода сплошной фазы при идентичном сечении для прохода дисперсной фазы. Расчет проводился при увеличенной удельной нагрузке по сплошной фазе  $69 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  и удельной нагрузке по дисперсной фазе  $5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Конфигурация распределительных устройств, показатели эффективности распределения и расчетные скорости фаз представлены в таблице 7:

Таблица 7 – Конфигурация распределительных устройств, показатели эффективности распределения и расчетные скорости фаз

Параметр	Перераспределительная тарелка с 24 патрубками	Предлагаемый перераспределитель
Конструктивные особенности:		
Диаметр внутреннего устройства, мм	600	600
Диаметр отверстий, мм	8	8
Шаг между отверстиями, мм	69	69
Число отверстий	52	52
Внутренний диаметр патрубков (ширина окна), мм	78	50
Толщина стенки патрубков (пластин), мм	3	3
Расстояние от края отверстия до кромки патрубка (решетки), мм	2,5	2,5
Высота патрубков (решетки), мм	100	100
Площадь для прохода сплошной фазы, $\text{м}^2$	0,115	0,135
Площадь для прохода сплошной фазы в % от полного сечения аппарата	40,6	47,7
Площадь для прохода дисперсной фазы, $\text{м}^2$	0,0026	0,0026
Показатели эффективности распределения сплошной фазы:		
$I_{BM}$ (500 мм над устройством)	0,07 – 0,10	0,08 – 0,09
$I_{BM}$ (300 мм под устройством)	0,20 – 0,25	0,19 – 0,22
$\Phi_1(U)$ (500 мм над устройством)	0,49 – 0,50	0,49 – 0,50
$\Phi_2(U)$ (300 мм под устройством)	0,39 – 0,41	0,40 – 0,42
Показатель эффективности распределения дисперсной фазы:		
$\Phi(\varphi)$ (300 мм под устройством)	0,63 – 0,64	0,64 – 0,66
Расчетные скорости фаз:		
Скорость сплошной фазы в патрубках (окнах), м/с	0,05	0,04
Скорость дисперсной фазы в отверстиях, м/с	0,15	0,15
Фиктивная скорость сплошной фазы, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	69,0	
Фиктивная скорость дисперсной фазы, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	4,8	

Результаты расчетов говорят о том, что предлагаемый перераспределитель жидкости обеспечивает снижение обратного перемешивания сплошной фазы на входе в перераспределитель (величина  $I_{BM}$  в серии расчетов предлагаемого изобретения оказалась примерно на 4–10 % меньше, чем при расчете перераспределителя с 24 патрубками). Кроме того, предлагаемая конструкция перераспределителя жидкости в текущих условиях обеспечивает более равномерное распределение дисперсной фазы даже при одинаковом количестве отверстий (величина  $\Phi(\varphi)$  в серии расчетов предлагаемого изобретения оказалась примерно на 2–3 % выше, чем при расчете перераспределителя с 24 патрубками). Данный факт можно объяснить тем, что в условиях высокой нагрузки по сплошной фазе обратное перемешивание в зоне распределения капель оказывает ощутимое влияние на распределение дисперсной фазы.

Таким образом, предлагаемая конструкция перераспределителя жидкости матричной конструкции дает возможность обеспечения более равномерного распределения сплошной и дисперсной фазы, а также возможность работы в более широком диапазоне нагрузок по сплошной фазе с сохранением эффективного распределения, в том числе при высокой нагрузке по сплошной фазе и высокой кратности сплошная фаза / дисперсная фаза.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для систем «жидкость-жидкость» разработаны математические модели истечения дисперсной фазы и распределения потока дисперсной фазы в распределительном устройстве, позволяющие оценить эффективность распределения на основе расчета доли, расхода и скорости потока в каждом отверстии, а также определить перепад давления в распределительном устройстве.

2. Введены показатели количественной оценки эффективности распределения фаз в экстракционных аппаратах, рассчитываемые по результатам CFD-моделирования:

- интенсивность обратного перемешивания  $I_{BM}$ ;
- функция эффективности распределения сплошной фазы  $\Phi(U)$ ;
- функция эффективности распределения дисперсной фазы  $\Phi(\varphi)$ .

На основе данных показателей предложена методика количественной оценки равномерности распределения сплошной и дисперсной фаз в распределительных и перераспределительных устройствах с помощью средств CFD-анализа.

3. Получены зависимости функций эффективности распределения для сплошной и дисперсной фаз от конструктивных параметров перераспределительных тарелок и проведена оптимизация конструкции перераспределительной тарелки на примере колонны демеркаптанализации СУГ. На основании этого выполнен расчет и подбор внутренних распределительных устройств в колонне аминовой очистки СУГ К-6 и колонне демеркаптанализации СУГ К-8 блока получения сжиженных углеводородных газов установки ЭЛОУ-АВТ-2,5(II) АО «Новошахтинский завод нефтепродуктов». Получен акт внедрения.

4. Разработана новая конструкция трубчатого распределителя дисперсной фазы, позволяющая расширить диапазон эффективной работы распределителя на 41 % с обеспечением равномерности распределения на уровне 90 %. Получен патент на полезную модель «Распределитель дисперсной фазы» № 219832.

Предложена новая конструкция перераспределителя жидкости, позволяющая обеспечить равномерное распределение сплошной и дисперсной фаз в условиях высокого соотношения расходов сплошная фаза/дисперсная фаза. Методами CFD-анализа показано, что по сравнению с

типовыми конструкциями перераспределительных тарелок предлагаемая конструкция обеспечивает снижение интенсивности обратного перемешивания на входе в перераспределитель на 10 % и увеличение эффективности распределения дисперсной фазы на 3 %. Получен патент на изобретение «Перераспределитель жидкости» № 2783943.

5. Определены конструктивные и технологические условия для повышения эффективности работы трубчатых распределителей дисперсной фазы в насадочных экстракционных колоннах:

- установлено, что для обеспечения эффективного распределения дисперсной фазы трубчатый распределитель целесообразно проектировать таким образом, чтобы площадь поперечного сечения всех отверстий в боковой трубке распределителя составляла 26-28 % от площади поперечного сечения боковой трубки;

- показано, что эффективность распределения дисперсной фазы в трубчатом распределителе может быть увеличена путем кратковременного перехода в развитый струйный режим с последующим возвратом в рабочий режим. С помощью методов теории подобия показано, что для этого должно выполняться условие:  $Fr_o \leq (d_T/d_o)^{3/4}$ , где  $Fr_o$  – модифицированный критерий Фруда для отверстия,  $d_T/d_o$  – соотношение диаметров боковых трубок и отверстий в ней.

6. Применительно к системам «жидкость-жидкость» определены диапазоны эффективной работы трубчатых распределителей дисперсной фазы при различном соотношении поперечного сечения боковой трубки и сечения всех отверстий:

- для типовой конструкции распределителя: 2,2 – 2,6;
- для предлагаемой нами конструкции распределителя: 3,1 – 3,7.

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих научных трудах:  
В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:**

1. Муллабаев, К.А. Разработка методов оценки равномерности распределения фаз в насадочных экстракторах средствами CFD-систем / К.А. Муллабаев, С.К. Чуракова, А.Р. Валеев // Башкирский химический журнал. – 2022. – Т.29. – № 2. – С. 71-76.
2. Муллабаев, К.А. Оптимизация конструкции перераспределителей жидкости в насадочных экстракторах методами CFD-анализа на примере колонны демеркаптанализации сжиженных углеводородных газов / К.А. Муллабаев, С.К. Чуракова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2022. – № 10. – С. 10-14.
3. Муллабаев, К.А. Разработка математической модели истечения дисперсной фазы с применением метода Volume of Fluid / К.А. Муллабаев, С.К. Чуракова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2023. – № 2. – С. 3-7.
4. Муллабаев, К.А. Совершенствование конструкции перераспределителей жидкости с целью обеспечения эффективной работы насадочных экстракторов при высоких нагрузках по сплошной фазе / К.А. Муллабаев, С.К. Чуракова // Технологии нефти и газа. – 2023. – Т. 149. – № 6. – С. 55-59.
5. Валеев, А.Р. Анализ конструктивного оформления трубчатых распределителей с целью повышения равномерности распределения жидкой фазы / А.Р. Валеев, С.К. Чуракова, К.А. Муллабаев // Башкирский химический журнал. – 2023. – Т. 30. – № 4. – С. 111-116.

**В патентах:**

6. Пат. на изобретение № RU 2783943. Перераспределитель жидкости / К.А. Муллабаев, С.К. Чуракова; заявитель и правообладатель УГНТУ – № 94025746/25; заявл. 25.04.2022; опубл. 22.11.2022. Бюл. № 33.

7. Пат. на полезную модель № RU 219832. Распределитель дисперсной фазы / К.А. Муллабаев, С.К. Чуракова; заявитель и правообладатель УГНТУ – № 2023107615; заявл. 28.03.2023; опубл. 09.08.2023. Бюл. № 22.

**В программах на ЭВМ:**

8. Расчет распределительных устройств насадочных экстракционных колонн / К.А. Муллабаев, С.К. Чуракова. Св-во о регистрации программы на ЭВМ № 2023617701. Правообладатели К.А. Муллабаев, С.К. Чуракова, заявл. 30.03.2023 № 2023616372/69; опубл. 12.04.2023.

9. Расчет пропускной способности насадочных экстракционных колонн / К.А. Муллабаев, С.К. Чуракова. Св-во о регистрации программы на ЭВМ № 2023619836. Правообладатели К.А. Муллабаев, С.К. Чуракова, заявл. 30.03.2023 № 2621081257; опубл. 17.05.2023.

10. Гидродинамический расчет распределительной трубы / К.А. Муллабаев, С.К. Чуракова. Св-во о регистрации программы на ЭВМ № 2023686471. Правообладатели К.А. Муллабаев, С.К. Чуракова, заявл. 27.11.2023 № 2023686245/69; опубл. 06.12.2023.

**В учебном пособии:**

11. Муллабаев, К.А. Технологический и гидравлический расчет колонн жидкостной экстракции: учебное пособие / К.А. Муллабаев, С.К. Чуракова. – Уфа, УГНТУ, 2022. – 84 с.

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

12. Муллабаев К.А. Некоторые аспекты исследования насадочных экстракционных колонн с целью изучения их гидродинамических и массообменных характеристик / К.А. Муллабаев, С.К. Чуракова, Е.К. Константинов, Д.В. Лесной, Т.И. Маннанов // В сборнике "Химическая технология и экология в нефтяной и газовой промышленности" (Булатовские чтения). – 2020. – Т.5. – С. 180-182.

13. Маннанов, Т.И. CFD-анализ – современный подход к исследованию процесса разделения и распределения потоков в устройствах ввода сырья массообменных аппаратов / Т.И. Маннанов, С.К. Чуракова, Д.В. Лесной, Е.К. Константинов, К.А. Муллабаев // В сборнике "Химическая технология и экология в нефтяной и газовой промышленности" (Булатовские чтения). – 2020. – Краснодар: Изд. ООО «Издательский дом – Юг». – Т.5. – С. 159-165.

14. Муллабаев, К.А. Метод оценки распределения потоков в колонных аппаратах средствами CFD-систем / К.А. Муллабаев, С.К. Чуракова // В сборнике материалов VI Международной научной конференции «Теория и практика массообменных процессов химической технологии» (Марушкинские чтения). – Уфа: УГНТУ, 2021. – Т. 11. – С. 50-51.

15. Муллабаев, К.А. Исследование конструкций перераспределительных тарелок насадочных экстракционных колонн методами CFD-анализа / К.А. Муллабаев, Д.В. Лесной, С.К. Чуракова // В сборнике материалов VI Международной научной конференции «Теория и практика массообменных процессов химической технологии» (Марушкинские чтения). – Уфа: УГНТУ, 2021. – Т. 11. – С. 116-117.

16. Муллабаев, К.А. Определение межфазного натяжения на границе вода-масло сталагмометрическим методом (методом счета капель) / К.А. Муллабаев, С.К. Чуракова // В сборнике материалов международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Башкирской нефти. – Уфа: УГНТУ, 2022. – С. 72-74.

17. Муллабаев, К.А. Метод расчета числа отверстий в полотне / К.А. Муллабаев, С.К. Чуракова // В сборнике материалов международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Башкирской нефти. – Уфа: УГНТУ, 2022. – С. 74-76.

18. Муллабаев, К.А. Исследовательский стенд для изучения процессов истечения капель / К.А. Муллабаев, С.К. Чуракова // В сборнике "Химическая технология и экология в нефтяной и газовой промышленности" (Булатовские чтения). – 2023. – Т. 2. – С. 101-102.
19. Муллабаев, К.А. Обзор методов оценки равномерности распределения потоков в колонных аппаратах / К.А. Муллабаев, С.К. Чуракова, А.Р. Валеев // В сборнике "Химическая технология и экология в нефтяной и газовой промышленности" (Булатовские чтения). – 2023. – Т. 2. – С. 103-105.
20. Валеев, А.Р. Оценка равномерности распределения жидкой фазы в трубчатом распределителе методом CFD-анализа при различных плотностях жидкой фазы / А.Р. Валеев, С.К. Чуракова, К.А. Муллабаев // В сборнике "Химическая технология и экология в нефтяной и газовой промышленности" (Булатовские чтения). – 2023. – Т. 2. – С. 58-59.
21. Муллабаев, К.А. Математическая модель распределения потока в боковых трубках распределителей дисперсной фазы / К.А. Муллабаев, С.К. Чуракова, А.Р. Валеев // Актуальные проблемы и направления развития технологий органического и неорганического синтеза в условиях импортозамещения: сб. матер. III Межд. науч.-практ. конф. – Уфа: из-во Нефтегазовое дело, 2023. – Т. 2. – С. 36-41.
22. Муллабаев, К.А. О влиянии направления изменения подачи дисперсной фазы на эффективность ее распределения в трубчатом распределителе / К.А. Муллабаев, С.К. Чуракова // Актуальные проблемы и направления развития технологий органического и неорганического синтеза в условиях импортозамещения: сб. матер. III Межд. науч.-практ. конф. – Уфа: из-во Нефтегазовое дело, 2023. – Т. 2. – С. 41-44.