

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Муллабаева Камиля Азаматовича «Особенности гидродинамики распределительных устройств в насадочных экстракционных аппаратах», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.13. – Процессы и аппараты химических технологий

Процессы экстракции в системах «жидкость – жидкость» находят широкое применение в нефтеперерабатывающей, нефтехимической, химической и многих других отраслях промышленности. Из числа гравитационных экстракторов широкое распространение получили насадочные экстракторы, которые хотя и имеют несколько меньшую производительность по сравнению с распылительными экстракторами, но интенсивность массопередачи в аппаратах этого типа выше. Как известно, экстракторам колонного типа присущ общий недостаток – наличие масштабного эффекта. Он проявляется в увеличении высоты единицы переноса при увеличении диаметра аппарата. Этот эффект связан с неоднородностью поля скоростей по высоте и диаметру аппарата. Для обеспечения равномерного распределения потоков сплошной и дисперсной фазы требуется эффективная работа распределительных и перераспределительных устройств. По этой причине тема диссертации К.А. Муллабаева, посвященной исследованию и совершенствованию конструкций распределительных устройств несомненно является **актуальной**.

**Степень обоснованности** научных положений, выводов и рекомендаций, их **достоверность** подтверждается тем, что работа основывается на фундаментальных законах и уравнениях гидродинамики. Камиль Азаматович Муллабаев использовал широко апробированные методы компьютерной гидродинамики. Им проведены экспериментальные исследования, которые позволили найти необходимые для расчетов



характеристики систем «жидкость – жидкость». К их числу относятся межфазные натяжения для исследуемых систем «вода – масло», «вода – бензин», а также краевые углы смачивания латунных и стальных поверхностей. Автор провел экспериментальные исследования на стенде по истечению масла и бензина в воду через сопло для подтверждения адекватности расчетной методики.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем. Автор разработал показатели эффективности распределения сплошной и дисперсной фаз в колонных экстракторах, используя которые можно на основании расчетов оценивать равномерность распределения потоков в распределительных и перераспределительных устройствах. Путем численных расчетов К.А. Муллабаев установил, что причиной неравномерности распределения дисперсной фазы в трубчатых распределителях может являться образование застойных зон, занятых сплошной фазой, а также предложил возможный способ улучшения равномерности распределения. Этот метод заключается в кратковременном переходе от капельного режима истечения в струйный режим и последующем возврате в капельный режим. Путем проведения большого числа расчетов автор изучил влияние конструктивных параметров перераспределителей на равномерность распределения сплошной и дисперсной фаз.

Результаты работы имеют существенную **практическую значимость**. К.А. Муллабаев сформулировал **рекомендации** по проектированию трубчатых распределителей дисперсной фазы в экстракционных аппаратах, в частности, рекомендации по расчету требуемого диаметра боковых трубок распределителей. На основании расчетного исследования по распределению потока дисперсной фазы в боковых трубках при различных подачах дисперсной фазы автором определены диапазоны эффективной работы трубчатых распределителей дисперсной фазы для систем «жидкость-жидкость». Предложена усовершенствованная конструкция распределителя



дисперсной фазы с трубками, имеющими дополнительное отверстие для вытеснения сплошной фазы (получен патент на полезную модель). Для экстракционных колонн выданы рекомендации по проектированию перераспределительных тарелок. Предложена новая конструкция перераспределителя жидкости, позволяющая обеспечить равномерное распределение сплошной и дисперсной фаз в условиях высокого соотношения расходов сплошная фаза/дисперсная фаза (матричный перераспределитель). На новую конструкцию получен патент на изобретение. Все эти результаты могут быть использованы проектными институтами при расчете и подборе колонного оборудования, а также высшими учебными заведениями при обучении студентов технических специальностей. Результаты работы уже нашли практическое применение, что подтверждается актом внедрения результатов диссертационного исследования на предприятии АО «Новошахтинский завод нефтепродуктов».

Результаты диссертационной работы Муллабаева К.А. могут быть **рекомендованы** к внедрению на предприятиях топливно-энергетического комплекса. Они могут быть также использованы в проектных институтах, инжиниринговых компаниях при разработке технических решений по модернизации как существующих насадочных экстракционных аппаратов, так и при проектировании новых.

Результаты работы опубликованы в 22 работах, 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. Результаты работы прошли апробацию на ряде международных конференций.

Автореферат и опубликованные соискателем печатные работы в полном объеме отражают положения диссертационной работы, соответствуют ее содержанию и задачам исследования, раскрывают положения ее научной



новизны. Объем автореферата достаточен для понимания существа проведенных исследований, материал оформлен в соответствии с предъявляемыми требованиями. Диссертация и автореферат написаны хорошим научным языком.

Диссертационная работа построена традиционным способом: введение, четыре главы, заключение, список литературы, содержащий 167 ссылок и приложений, содержащих результаты расчетов показателей распределения, результаты расчетов истечения дисперсной фазы из отверстий, акт внедрения и справку об использовании учебного пособия. Работа изложена на 204 страницах, содержит 53 таблицы и 79 рисунков.

*Во введении* обосновывается актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, охарактеризована научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

*В первой главе* дан литературный обзор конструкций распределительных и перераспределительных устройств, используемых в насадочных экстракционных аппаратах, а также сформулированы рекомендации по проектированию распределительных устройств применительно к колоннам жидкостной экстракции. Кроме этого, в главе проведен обзор известных на сегодняшний день методов оценки равномерности распределения потоков. Автор отмечает, что в настоящее время расчетные методики оценки равномерности распределения потоков практически отсутствуют. Перспективным является метод, который основан на использовании компьютерной гидродинамики.

*Во второй главе* охарактеризованы экспериментальные и расчетные методы исследования. Автором подробно описана экспериментальная установка для изучения процессов истечения нефтепродуктов в водную фазу, а также представлены результаты опытов по определению межфазного натяжения на границе «нефтепродукт-вода» и краевых углов смачивания на границе «нефтепродукт-вода-металлическая подложка». Эти данные



используются в дальнейшем при разработке CFD-моделей. Описание методов расчетного исследования распределителей дисперсной фазы и перераспределителей жидкости также представлено в достаточно развернутой форме. Важно отметить, что моделирование распределителей дисперсной фазы и перераспределителей жидкости проводилось в различных расчетных модулях (ANSYS FLUENT и ANSYS CFX соответственно), с применением различных подходов к описанию многофазных течений (методы VOF и Eulerian-Lagrangian соответственно), на разных масштабных уровнях. В рамках данной главы автором также была предложена методика оценки эффективности распределения сплошной и дисперсной фаз в аппарате с помощью средств CFD-анализа, основанная на расчете трех показателей: интенсивности обратного перемешивания, функции эффективности распределения сплошной фазы и функции эффективности распределения дисперсной фазы. Выводы по главе достаточно полно раскрывают содержание данной главы.

*Третья глава* посвящена исследованию гидродинамических процессов, происходящих при распределении потока в трубчатых распределителях дисперсной фазы. Адекватность разработанной CFD-модели истечения дисперсной фазы была убедительно доказана автором методами статистической обработки данных по времени образования капель, полученных при различной подаче нефтепродуктов в экспериментах и расчетах. Расчеты проводились для двух систем: «масло – вода» и «бензин вода». Нужно отметить, что исследование конструкций трубчатых распределителей было ограничено процессами, происходящими в боковых трубках, при этом весь распределитель не моделировался. Методами вычислительной гидродинамики проанализировано влияние подачи дисперсной фазы и соотношения диаметров боковых трубок и отверстий на эффективность распределения дисперсной фазы при различном количестве отверстий в боковой трубке. Муллабаев К.А. обсудил причины низкой эффективности распределения дисперсной фазы при низких скоростях потока



в трубке, а также показал, что кратковременный переход в развитый струйный режим с последующим возвратом в рабочий режим в некоторых случаях позволяет увеличить эффективность распределения. Автором определены условия, при которых достигается данный эффект. Кроме того, Муллабаевым К.А. предложена конструкция распределителя дисперсной фазы, имеющего дополнительное отверстие в боковых трубках (получен патент на полезную модель), улучшение эффективности распределения при низких скоростях потока убедительно доказано расчетами. Также в данной главе представлены рекомендации по выбору диаметра боковых трубок распределителей дисперсной фазы для обеспечения эффективного распределения потока. Наконец, применительно к системам «жидкость-жидкость» определены диапазоны эффективной работы распределителей дисперсной фазы типовой и предлагаемой конструкций. Здесь также стоит отметить, что полученные автором результаты хорошо согласуются с данными по типовым распределителям жидкой фазы, представленными ведущими производителями внутренних устройств.

*Четвертая глава* посвящена исследованию и совершенствованию конструктивного оформления перераспределителей жидкости методами CFD-анализа. Для оценки применимости разработанной модели автором сопоставлены результаты расчетов по истечению тяжелой фазы из отверстий со справочными данными. Расчеты проводились для систем «вода – воздух» и «вода – бензин». Муллабаевым К.А. получено большое количество расчетных данных по эффективности распределения сплошной и дисперсной фаз в экстракционном аппарате при различных конструктивных параметрах перераспределительных тарелок (количество и взаимное расположение патрубков относительно друг друга, взаимное расположение патрубков и отверстий, диаметр и высота поднятия шляпок над патрубками). Нужно отметить, что исследование проводилось при заданных нагрузках по сплошной и дисперсной фазам, соответствующим реальным условиям работы аппарата. На основании полученных данных CFD-моделирования автором



определены оптимальное соотношение высоты поднятия шляпки и диаметра патрубка, оптимальное соотношение диаметра шляпки и диаметра патрубка, а также наиболее предпочтительное отношение расстояния между центрами соседних патрубков к диаметру колонны для перераспределительной тарелки с 7 патрубками. С целью улучшения эффективности распределения фаз Муллабаевым К.А. предложена новая конструкция перераспределителя жидкости (получен патент). В соответствии с расчетами равномерность распределения дисперсной фазы увеличивается на 2-3 %, а обратное перемешивание сплошной фазы на входе в перераспределитель снижается на 4-10 % по сравнению с типовой конструкцией перераспределительной тарелки.

По диссертационной работе имеются следующие **вопросы и замечания**:

1. В работе изучается гидродинамика распределительных устройств в насадочных экстракторах. Однако влияние насадки на работу этих устройств никак не обсуждается. Поэтому остается неясным, справедливы ли полученные выводы для насадок любых типов, или выбор распределительного устройства как-то связан с типом и характеристиками насадки (регулярная, нерегулярная и т.п.). В насадочных экстракторах происходит многократное дробление и слияние капель. Поэтому средний размер капель в слое насадки не совпадает с размерами капель, образующихся в распределителе дисперсной фазы. А расположение распределителя может играть важную роль. В известной монографии Трейбала по жидкостной экстракции говорится о том, что при подаче дисперсной фазы через сопла эти сопла должны быть заглублены в слой насадки.

2. На стр. 40 диссертации автор пишет: «Цель проведения испытаний на стенде – построение адекватной расчётной модели истечения дисперсной фазы путем подбора настроечных параметров, при которых наблюдается сходимость результатов эксперимента и результатов расчета по модели». Однако из дальнейшего не ясно, какие именно параметры выбираются и как



этот выбор влияет на результаты расчета. Было бы интересно провести эксперименты по истечению через отверстия в горизонтальных трубках и провести сравнение с расчетом.

3. При проведении расчетов по необходимости приходится в той или иной мере огрублять реальную картину движения фаз в аппарате. Так, например, рассматривая распределитель дисперсной фазы автор рассчитывает истечение через отверстия в неподвижную жидкость. Но в реальных условиях происходит противоточное движение сплошной и дисперсной фаз, причем сплошная фаза может приобретать неравномерный профиль скорости в слое насадки. Было бы полезно попытаться оценить, при каких условиях влияние потока сплошной фазы на истечение капель несущественно.

4. Перераспределительные тарелки должны устранять неравномерность распределения потоков, возникающую в слое насадки. Поэтому при расчетном анализе работы таких устройств следовало бы учитывать наличие такой неравномерности. Автор рассчитывает характеристики распределения фаз на расстояниях 50 см над тарелкой и 30 см под тарелкой, причем насадка там отсутствует. Может ли быть так в реальной ситуации?

5. К.А. Муллабаев проводит расчеты для нескольких модельных систем. Но использование компьютерной гидродинамики позволяет варьировать параметры в широких пределах и обобщать результаты в виде критериальных соотношений. Закономерности работы распределительных устройств для легко эмульгируемых систем, и систем, обладающим высоким межфазным натяжением, по-видимому различны. Разумеется, работа уже проделана очень большая и это скорее пожелание для дальнейшей работы.

6. Из текста второй главы не ясно, какие именно уравнения должны решаться в том или ином случае. Так, возможность учета сил межфазного натяжения, действующих на границе раздела двух сред, путем введения силы в уравнение Навье-Стокса не очевидна и требует объяснения. Непонятно, зачем понадобилось использовать модель турбулентности, если движение



жидкости в трубке распределителя характеризуется малыми числами Рейнольдса. Не ясно, почему в уравнении (2.25) стоит частная производная по времени и как вычисляются входящие туда силы.

7. Работа в целом хорошо оформлена, однако некоторые замечания по оформлению имеются. Неудачным является выражение «граничные условия применимости». Приводя формулу (1.3), автор ссылается на пособие по курсовому проектированию. Но у этой формулы есть автор. Ссылку нужно давать на первоисточник. На Рис.1.5 ряд позиционных обозначений не разъясняется в подписи к рисунку. На стр. 23 не указана единица измерения размерной величины  $\gamma$ . На Рис. 1.10 и 1.11 надписи сделаны на английском языке. Не удачно выражение «сверхзвуковые расчеты» на стр.46. На стр.51 автор пишет, «сила, ...входящая в уравнение Навье-Стокса (2.9)». Но (2.9) – выражение для диаметра капли. На стр. 59 автор пишет, что была учтена подъемная сила, описываемая некоторой моделью, но ссылки на литературный источник не дает. На рис. 3.21 плохо видны обозначения. На стр. 121 вместо «площади боковой трубки» должно быть «площади поперечного сечения».

Сделанные замечания не снижают значимости полученных научных результатов. По уровню актуальности, научной новизны, теоретической и практической ценности, новизны конструкторских решений, подтвержденной патентами РФ, внедрением результатов исследований на промышленном предприятии и в учебном процессе вуза, весомым публикациям и апробации на научных конференциях, диссертационная работа Муллабаева К.А. «Особенности гидродинамики распределительных устройств в насадочных экстракционных аппаратах» соответствует требованиям пункта 9 «Положение о присуждении учёных степеней» ВАК РФ, так как в ней изложены новые научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны в области оптимизации конструктивного оформления внутренних распределительных и



перераспределительных устройств экстракционного массообменного оборудования.

Соискатель Муллабаев К.А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.13. – «Процессы и аппараты химических технологий».

Доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры процессов и аппаратов Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета) Чесноков Юрий Георгиевич, 8-911-278-44-32

Ученая степень: доктор физико-математических наук по специальности 05.17.08 – «Процессы и аппараты химических технологий»

104-1  
25.04.24

Ю.Г. Чесноков

Адрес: 190013, г. Санкт-Петербург,  
Московский проспект, д. 24-26/49 лит. А  
Телефон: +7 812 494-92-03  
E-mail: [office@technolog.edu.ru](mailto:office@technolog.edu.ru)  
Веб-сайт: <https://technolog.edu.ru/>

Подпись *Чеснокова Юрий Георгиевич*  
*Чесноков*  
Начальник отдела ка...  
*Ширеева*

