



ПОТВЕРЖДАЮ

Директор ФИЦ КазНЦ РАН
академик РАН, д.х.н.

Синяшин О.Г.

«__» _____ 2019 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

«Федеральный исследовательский центр

«Казанский научный центр Российской академии наук»

на диссертацию Сухарева Тимура Юрьевича на тему

«Численное моделирование процессов гидродинамического

перемешивания», представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 –

«Механика жидкости, газа и плазмы».

Актуальность.

Технологии гомогенизации смесей являются неотъемлемой частью производственных циклов во многих отраслях промышленности. Многие из них, например, обработка строительных растворов, расплавов полимеров и суспензий происходят в высоковязких средах. Основная задача перемешивания состоит в получении максимально однородных по пространству композиций. Для этой цели созданы различные группы перемешивающих аппаратов. Понимание гидромеханического поведения отдельных частиц примеси и их агрегатов имеет важное значение для повышения эффективности этих технологий. В ряде случаев, процессы в перемешивающих устройствах рассматриваются в рамках теории двухфазных сред. Мощным инструментом в данном направлении является численное моделирование. В настоящее время вычислительные мощности ЭВМ позволяют использовать сложные математические модели, которые дают возможность в деталях проследить ход протекаемых процессов. Разработанные при этом программно-алгоритмические решения могут

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ

Вх. №

22 11 20 19

быть использованы для создания эффективных схем колебательных устройств микширования и режимов их работы.

Содержание работы.

Диссертационная работа изложена на 127 страницах, состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы, содержащего 141 наименование.

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, описаны методы исследования, обоснована научная новизна и отмечена практическая значимость.

В первой главе дан обзор литературы, конкретизирована область исследования, представлена математическая модель двухфазной жидкости и критерии оценки эффективности перемешивания.

Вторая глава посвящена численному моделированию процессов гидродинамического перемешивания в установках колебательного типа. Представлены постановка задачи и описание особенностей моделирования течений в данном типе устройств, проведено сравнение с экспериментальными данными, выполнен широкомасштабный параметрический анализ и построена соответствующая карта режимов, рассмотрен вопрос масштабирования устройств.

Третья глава посвящена численному моделированию процессов перемешивания в системе подвижных коаксиальных профилированных цилиндров. Проведена валидация математической модели и численных алгоритмов на задаче о течении между двумя эксцентрично расположенными цилиндрами. На основании анализа особых точек в векторном поле скорости жидкости представлен способ профилирования внутреннего цилиндра. Сформулированы числа подобия, построена карта режимов и определен наиболее технологичный протокол перемешивания.

Четвертая глава посвящена редукции моделей гидродинамического перемешивания на основе DMD-алгоритма. Применительно к задачам перемешивания изложен алгоритм разложений по динамическим модам. В качестве приложения рассмотрена задача о перемешивании в каверне с подвижными дном и крышкой.

В пятой главе дано введение в проблему моделирования гибких волокон в жидкой среде. Проводится сравнение численного решения

задачи о деформации волокна в сдвиговом течении Куэтта с результатами других авторов, аналитическими решениями и данными физического эксперимента. Формулируется задача о перемешивании с волокнистыми включениями в прямоугольной камере. С целью определения эффективных режимов работы устройства с позиций перемешивания и ориентации ансамбля волокон проводится исследование влияния периода разрывного протокола.

В заключении сформулированы основные результаты, выносимые на защиту.

Наиболее существенные результаты, полученные соискателем:

Разработаны методы, алгоритмическое и программное обеспечение для моделирования процессов гидродинамического перемешивания, которые позволяют описывать пространственно-временные структуры в сложных течениях и оценивать их влияние на процесс перемешивания. Это создаёт основы для выбора эффективных схем перемешивающих устройств и оптимальных режимов их работы.

Представлены результаты численного моделирования процессов гидродинамического перемешивания в установках колебательного типа. Исследовано влияние на процесс перемешивания амплитудно-частотных характеристик колеблющегося элемента, а также его геометрической формы. Получена карта режимов в плоскости «эффективность перемешивания – потребляемая мощность». Предложена методика оптимального размещения рабочих элементов.

Представлены результаты численного моделирования процессов гидродинамического перемешивания в системе подвижных коаксиальных профилированных цилиндров. Определены эффективные протоколы перемешивания, построена соответствующая карта режимов. Предложена методика профилирования внутреннего цилиндра на основе анализа особых точек в векторном поле скорости жидкости. Выявлен наиболее технологичный способ управления процессом перемешивания.

Сформулированы числа подобия для перемешивающих устройств двух различных классов. С помощью вычислительных экспериментов доказана их состоятельность.

С использованием разложений по динамическим модам разработаны алгоритмы и построены редуцированные модели для ряда задач перемешивания. Данный подход обеспечивает эффективное хранение информации о поле течения.

Сформулирована комплексная математическая модель динамики гибкого волокна в жидкой среде. Разработан и апробирован соответствующий программно-алгоритмический комплекс. Исследовано влияние протокола перемешивания на ориентацию ансамбля волокон в представленном типе устройств.

Достоверность полученных результатов.

Достоверность результатов диссертации обусловлена использованием современного математического аппарата, согласованностью результатов проведенных вычислительных экспериментов с аналитическими решениями и данными экспериментов.

Практическая и научная ценность результатов.

Практическая ценность работы состоит в том, что предложены способы, позволяющие находить эффективные схемы и режимы работы смесительных устройств, используемых в различных отраслях народного хозяйства, где технологическая цепочка включает перемешивание и гомогенизацию.

Научная ценность состоит в разработке программно-алгоритмических решений для моделирования процессов перемешивания.

Рекомендации по использованию результатов диссертации.

Результаты диссертации Сухарева Т.Ю. могут быть использованы в теоретических и прикладных исследованиях, проводимых в ИММ КазНЦ РАН, ИМАШ РАН, МАИ, проектных организациях нефтегазовой отрасли и других, занимающихся данной и смежными тематиками.

Замечания по диссертационной работе:

1. В диссертационной работе рассматриваются только двумерные постановки задач и только колебательные способы движения рабочего элемента. Влияние силы тяжести на процессы смешивания не учитывается. Это сильно сужает класс устройств, поскольку на практике большинство перемешивающих устройств использует трехмерность, при этом зачастую вкупе с

использованием сил гравитации. Кроме этого, большинство смесителей действуют на основе вращательных, а не колебательных движений рабочего элемента. Учитывая возможности современной вычислительной техники, было бы интересно оценить влияние трехмерных эффектов на процессы перемешивания.

2. В разделе 2.3 на рис. 2.10 представлены зависимости критериев эффективности перемешивания от времени. Так как на одном изображении присутствуют графики, полученные при разных частотах, то было бы целесообразно откладывать по оси ОХ число периодов.
3. В главе 2 изучается влияние формы лопаток, их расположения в пространстве, а также амплитудно-частотных характеристик колебаний на динамику перемешивания. При этом влияние относительных размеров лопаток на перемешивание практически не исследуется. В разделе 2.5 на рис. 2.15-2.18 размеры лопаток в шести вариантах различны, хотя желательно сравнивать эффективность перемешивания при одинаковых миделевых сечениях лопаток. Отношение размера лопатки к размеру устройства или к амплитуде колебаний отсутствует в разделе 2.6., посвященному масштабированию устройств перемешивания. Введенные там аналоги чисел Рейнольдса и Струхалия не очевидны и также не содержат размер лопатки.
4. В главе 3 при рассмотрении процессов гидродинамического перемешивания в системе подвижных коаксиальных цилиндров не используются критерии эффективности перемешивания из раздела 1.3. Это было бы актуально при оценке введенных автором безразмерных критериев. В разделе 3.5 также не ясен физический смысл введенных аналогов чисел Рейнольдса и Струхалия.
5. В разделе 5.1 учет динамики собственного вращения каждой связанной сферы, условно составляющей волокно, представляется несущественным и усложняет математическую модель (формула 5.10-5.11). Волокна моделируются связанными сферами малого

диаметра, поэтому собственным вращением сфер можно пренебречь по сравнению с коллективным вращением связанных сфер, вызванным градиентом силы вязкого сопротивления.

б. В диссертационной работе нет данных о вычислительных затратах при проведении численных экспериментов.

Данные замечания не снижают общего положительного впечатления о работе.

Заключение. Диссертация Сухарева Т.Ю. представляет собой законченную актуальную, достоверную и обоснованную научно-квалификационную работу с возможностью практического применения и потенциалом дальнейшего исследования. Работа выполнена на высоком научном уровне, содержит достаточное количество исходных данных, имеет пояснения, рисунки и графики. Результаты диссертации опубликованы в 12 научных работах, из них пять опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, которые также входят в базы данных WoS и Scopus. Работа удовлетворяет требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и паспорту специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Автореферат полностью и точно отражает основные результаты работы и соответствует содержанию диссертации.

На основании вышесказанного считаем, что диссертационная работа «Численное моделирование процессов гидродинамического перемешивания» удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», а ее автор, Сухарев Тимур Юрьевич, заслуживает присуждения ему искомой ученой степени.

Работа доложена автором и обсуждена 20.11.2019 г. на расширенном заседании отдела механики многофазных сред Института механики и машиностроения - обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук». Отзыв на диссертацию подготовлен на

