

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертационную работу Сухарева Тимура Юрьевича
«Численное моделирование процессов гидродинамического перемешивания»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических
наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».**

Диссертационная работа Сухарева Т.Ю. посвящена вопросам перемешивания при ламинарном режиме течения в перемешивающих устройствах разного рода. В данном направлении существенную роль играет компьютерное моделирование, которое позволяет в деталях описывать наблюдаемый процесс. Необходимость расчета двухфазных течений существенно усложняет процедуру моделирования, которую оказывается невозможным провести на основе исключительно имеющихся пакетов программ вычислительной гидродинамики. Данная диссертационная работа посвящена решению важной в научном и практическом отношении задачи – построению эффективных алгоритмов моделирования процессов гидродинамического перемешивания.

Структура и содержание диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, общим объемом в 127 страниц текста с 74 рисунками и 3 таблицами. В списке литературы диссертации приведено 141 наименование.

В первой главе дан обзор литературы, посвященной изучению процессов гидродинамического перемешивания, представлена математическая модель и выведены критерии оценки эффективности перемешивания.

Во второй главе, при помощи численного моделирования, исследовано влияние на интенсивность перемешивания формы подвижного элемента и его частотно-амплитудные характеристики в установках колебательного типа. Дана оценка потребляемой мощности. Выделены структуры в жидкости, обеспечивающие однородность распределения примеси, и оценено их влияния на темп перемешивания. С целью верификации используемой математической модели и алгоритма расчета проведено сравнение численных результатов с данными эксперимента. Применительно к рассматриваемым процессам сформулированы числа подобия. Также предложен подход к оптимальному размещению рабочих элементов в пространстве устройства колебательного типа, который основан на отслеживании каждой частицы примеси.

Третья глава посвящена исследованию перемешивания в системе подвижных коаксиальных профилированных цилиндров. Проведена апробация используемых средств компьютерного моделирования на аналитическом поле скорости высоковязкой жидкости между двумя эксцентрично расположенными вложенными цилиндрами. На основе анализа особых точек в векторном поле скорости определены застойные зоны и предложен метод борьбы с ними посредством профилирования внутреннего цилиндра

(«ротора») и подбора соответствующего протокола перемешивания. Введены безразмерные критерии, с использованием которых построена соответствующая карта режимов. Даны практические рекомендации по выбору протокола перемешивания.

В четвертой главе с использованием разложений по динамическим модам построены редуцированные модели гидродинамического перемешивания. Показано, что для различных периодических и режимов перемешивания применяемый подход позволяет получить достаточно точные пространственно-временные картины распределения примеси. Продемонстрирован выигрыш в хранении информации при применении данного метода редукации к задаче из второй главы.

В заключительной главе представлена математическая модель динамики гибких волокнистых включений в жидкости. Проведено тестирование соответствующего разработанного программного комплекса путем решения задачи о деформации волокна в сдвиговом течении Куэтта и сравнении полученных результатов с аналитическим решением, физическим экспериментом и данными других авторов. Сформулирована задача о перемешивании с волокнистыми включениями в прямоугольной каверне с подвижными границами. Предложен наиболее предпочтительный режим перемешивания, посредством варьирования периода разрывного протокола.

В заключении сформулированы основные результаты, выносимые на защиту.

Научная новизна.

В диссертации получены следующие новые результаты:

1. Созданы методы, алгоритмическое и программное обеспечение, которые позволяют описывать пространственно-временные структуры в сложных течениях жидкости (в установках с элементами, совершающими вращательные и колебательные движения) и оценивать их вклад на процесс гидродинамического перемешивания.
2. Исследованы процессы перемешивания в ряде установок колебательного типа. В ходе проведения параметрического анализа построена карта режимов, которая обеспечивает выбор протокола эффективного перемешивания при приемлемых энергетических затратах.
3. При рассмотрении перемешивания в системе подвижных коаксиальных цилиндров определены эффективные протоколы перемешивания, построена соответствующая карта режимов и предложена методика профилирования внутреннего цилиндра.
4. Введены безразмерные критерии, аналоги чисел Рейнольдса и Струхала, для перемешивающих устройств двух различных классов.
5. Представлен метод построения редуцированных моделей гидродинамического перемешивания, обеспечивающий эффективное хранение информации о поле скоростей течения жидкости.
6. Сформулирована математическая модель динамики гибкого волокна в жидкой среде, которая была реализована в авторском программном комплексе и апробирована на

ряде тестовых задач. Исследовано влияние протокола перемешивания на ориентацию ансамбля волокон в прямоугольной каверне с подвижными верхней и нижней границами.

Практическая ценность.

Практическая ценность диссертации состоит в том, что разработанные способы позволяют находить эффективные схемы и режимы работы перемешивающих устройств, а также дают возможность осуществить переход от лабораторных стендовых установок к реальным производственным аппаратам. Реализованные при этом программные комплексы предоставляют возможность экономично хранить информацию о поле течения и в деталях проследивать процесс формирования структуры композитных материалов.

Достоверность.

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечивается корректным применением соответствующего математического аппарата, непротиворечивостью получаемых решений общим гидродинамическим представлениям, качественным и количественным согласованием получаемых результатов с данными экспериментов и решений подобных задач другими авторами.

Апробация работы и публикации

Основные научные результаты, выводы и рекомендации диссертации опубликованы в реферируемых российских журналах, рекомендованных ВАК РФ, и докладывались на российских и международных конференциях.

Замечания по диссертационной работе

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. В основе диссертационного исследования лежит ряд существенных допущений: безынерционность частиц; двумерность течения; отсутствие влияния гравитационных сил на динамику частиц. В то же время, в тексте диссертации отсутствует явное обоснование применимости таких допущений.

2. Большинство представленных в работе численных результатов подкреплены сравнениями с экспериментом, однако не все они достаточно однозначны:

– В разделе 2.2 на стр. 42 (Рис. 2.3) не ясно, по каким параметрам происходит сравнение экспериментального и расчетного поля скорости. Кроме того, визуально невозможно отметить того качественного соответствия экспериментальной и численной картин течения, о котором заявляет автор.

– В разделе 5.2 на стр. 105 (Рис. 5.11) при сравнении результатов численного моделирования с физическим экспериментом не указаны ни параметры для модели волокна, ни условия эксперимента.

3. Имеется ряд замечаний к оформлению диссертации:

– Отсутствуют подписи под осями на Рис. 1.5, 3.2, 4.2-4.4, 5.6б, 5.7б, 5.9 и 5.14-5.19.

– С сожалением приходится отметить погрешности в стилистическом изложении и оформлении текста работы. В тексте встречаются опечатки, ряд орфографических и заметное количество пунктуационных ошибок. Например, бросается в глаза неправильное написание слова «помимо» (через пробел), встречающееся в тексте несколько раз.

Указанные замечания не ставят под сомнение квалификацию автора и не меняют общее положительное впечатление от работы.

Заключение.

Тема и содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы». Изложенные автором результаты содержат научную новизну, строго обоснованы, и опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК. Автореферат верно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

Диссертация Т.Ю. Сухарева «Численное моделирование процессов гидродинамического перемешивания» носит завершённый характер и заслуживает высокой оценки. Работа удовлетворяет требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор, Сухарев Тимур Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Официальный оппонент,

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Физический факультет

«28» ноября 2019 г.

Коротеева Екатерина Юрьевна

Почтовый адрес: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, д. 1, стр. 2, Физический факультет

Контактный телефон: + 7 (995) 500-61-05

Адрес электронной почты: koroteeva@physics.msu.ru

Декан
физического факультета МГУ
проф. Сысов Н.Н.

