

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ

Диссертационный совет: Д 212.125.14

Соискатель: Сухарев Тимур Юрьевич

Тема диссертации: Численное моделирование процессов гидродинамического перемешивания

Специальность: 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Решение диссертационного совета по результатам защиты: На заседании 20 декабря 2019 года, протокол № 14, диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация Сухарева Т. Ю. «Численное моделирование процессов гидродинамического перемешивания» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, и принял решение присудить Сухареву Тимуру Юрьевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

Присутствовали: Красильников П.С. – *председатель*, Гидаспов В.Ю. – *ученый секретарь*, а также члены диссертационного совета: Холостова О.В., Бардин Б.С., Буров А.А., Колесник С.А., Косенко И.И., Котельников В.А., Котельников М.В., Маркеев А.П., Ревизников Д.Л., Рябов П.Е., Сиротин А.Н., Формалев В. Ф., Ципенко А.В., Черепанов В.В., Шамолин М.В.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.14, к.ф.-м.н., доцент

В.Ю. Гидаспов



ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.125.14,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»,
ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 20.12.2019 № 17

О присуждении Сухареву Тимуру Юрьевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Численное моделирование процессов гидродинамического перемешивания» по специальности 01.02.05 — «Механика жидкости, газа и плазмы» принята к защите 16 октября 2019 года (протокол заседания № 10), диссертационным советом Д 212.125.14, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Министерство науки и высшего образования РФ, 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4, приказ Минобрнауки РФ о создании диссертационного совета – № 714/НК от 02.11.2012.

Соискатель Сухарев Тимур Юрьевич, 1992 года рождения, в 2015 году окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)" по специальности «Прикладная математика», в 2019 году окончил аспирантуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)». В период подготовки диссертации работал в филиале ФГБУН Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН «Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН» в лаборатории генерации нелинейных волн младшим научным сотрудником и по

совместительству на кафедре №806 «Вычислительная математика и программирование» МАИ в должности инженера.

Диссертация выполнена на кафедре № 806 «Вычислительная математика и программирование» факультета «Информационные технологии и прикладная математика» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), Министерства образования и науки РФ.

Научный руководитель — доктор физико-математических наук, Ревизников Дмитрий Леонидович, профессор кафедры № 806 «Вычислительная математика и программирование» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Официальные оппоненты:

1. Черкасов Сергей Гелиевич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Государственного научного центра Российской Федерации – федерального государственного унитарного предприятия «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша».
2. Коротеева Екатерина Юрьевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Оппоненты дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», г. Казань, в своем положительном отзыве, подписанном зав. отделом механики многофазных сред, чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. Губайдуллиным Дамиром Анваровичем и ведущим научным сотрудником лаборатории устойчивости и управления, с.н.с., д.ф.-м.н. Осиповым Петром Петровичем, указала, что диссертационная работа Сухарева Т. Ю. представляет собой законченную, актуальную, достоверную и обоснованную научно-квалификационную работу с возможностью практического применения и потенциалом дальнейшего исследования. Автореферат полностью и точно отражает основные результаты работы и соответствует содержанию диссертации. 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.

Соискатель имеет 16 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 12 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 5 работ.

Содержание данных работ в полной мере отражает содержание диссертационной работы, в которой отсутствуют некорректные и недостоверные ссылки. Все основные результаты, которые опубликованы в соавторстве, получены лично Сухаревым Т.Ю.

Наиболее значимые научные работы соискателя по теме диссертации:

1. Ганиев Р.Ф., Ревизников Д.Л., Сухарев Т.Ю., Украинский Л.Е. Волновое перемешивание в установках колебательного типа // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 3. С. 5-10. (WoS, Scopus)
2. Ганиев Р.Ф., Ревизников Д.Л., Сухарев Т.Ю., Украинский Л.Е. Оптимизация пространственного расположения рабочих элементов в установках колебательного типа // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 1. С. 3-8. (WoS, Scopus)
3. Ганиев Р.Ф., Ревизников Д.Л., Сухарев Т.Ю., Украинский Л.Е. Профилирование поверхностей рабочих элементов перемешивающих устройств // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 3. С. 3-9. (WoS, Scopus)
4. Ганиев Р.Ф., Ревизников Д.Л., Сухарев Т.Ю., Украинский Л.Е. Влияние формы лопатки на эффективность перемешивания в установках колебательного типа // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 2. С. 3-8. (WoS, Scopus)
5. Ганиев Р.Ф., Ревизников Д.Л., Сухарев Т.Ю., Украинский Л.Е. Волновое перемешивание в системе подвижных коаксиальных цилиндров // Доклады Академии наук. 2019. Т. 486, № 1. С. 30-33. (WoS, Scopus)

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Отзыв официального оппонента, д. ф.-м. н. Черкасова Сергея Гелиевича на диссертацию.

Отзыв положительный. Замечания по диссертационной работе:

- 1) При исследовании перемешивания под воздействием колебаний лопаток было бы интересно, для полноты картины, рассмотреть случай, когда лопатки колеблются с различной частотой.
- 2) В диссертации сформулированы физические критерии подобия, которые строго являются таковыми только при соблюдении полного геометрического подобия, но в тексте это обстоятельство не отмечено.
- 3) Помимо вынужденного гидродинамического перемешивания, на распределение частиц по объему жидкой фазы могут влиять и другие эффекты: свободная конвекция, броуновское движение, гравитационная седиментация и др. Из диссертации неясно, может ли разработанный расчетный инструментарий использоваться в качестве основы для численного моделирования с учетом тех или иных дополнительных эффектов.

2. Отзыв официального оппонента, к. ф.-м. н. Коротеевой Екатерины Юрьевны на диссертацию.

Отзыв положительный. Замечания по диссертационной работе:

- 1) В основе диссертационного исследования лежит ряд существенных допущений: безынерционность частиц; двумерность течения; отсутствия 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 картины 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.

3. Отзыв ведущей организации на диссертацию.

Ведущая организация дала положительный отзыв на диссертацию.

Замечания по диссертации:

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 вкуче 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 отсутствуют в разделе 2.6, посвященному масштабированию устройств перемешивания. Введенные там аналоги чисел Рейнольдса и Струхала 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 Струхала.

5) В разделе 5.1 учет динамики собственного вращения каждой связной сферы, условно составляющее волокно, представляется несущественным и усложняет математическую модель (формула 5.10-5.11). Волокна моделируются связными сферами малого диаметра, поэтому собственным вращением сфер можно пренебречь по сравнению с коллективным вращением связанных сфер, вызванным градиентом силы вязкого сопротивления.

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

4. Отзыв филиала ФГБУН Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН «Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН» на автореферат.

Отзыв подписан чл.-корр. РАН, доктором технических наук, профессором, заместителем директора по научной работе НЦ НВМТ РАН. Отзыв положительный. Замечание к автореферату:

В работе не представлены данные о вычислительных затратах при проведении численных исследований.

5. Отзыв ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» на автореферат.

Отзыв подписан доктором физико-математических наук, научным сотрудником научным сотрудником отдела «Специальные авиационные

двигатели и химмотология» Сергеем Ивановичем Мартыненко. Отзыв положительный. Замечание к автореферату:

- 1) Как следует из описания на с. 6 и 7 дисперсная фаза не оказывает влияние на основное течение. Какова область применения данной модели?
- 2) Останутся ли полученные в работе результаты справедливыми в трехмерном случае?
- 3) В автореферате сказано, что при моделировании дисперсной фазы для восстановления параметров потока в точке локализации частицы используется процедура интерполяции. Однако, не указан какой конкретно метод интерполяции использовался.

6. Отзыв ФГБУН «Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН» на автореферат.

Отзыв подписан кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником ИПМех РАН Крюковым Игорем Анатолиевичем. Отзыв положительный. Замечания к автореферату:

- 1) На стр. 8, при описании постановки задачи для установки колебательного типа, не указаны размеры прямоугольной расчетной области $L_x * L_y$. Это в должной мере не позволяет оценить геометрический масштаб устройства, в свою очередь для амплитуды и частоты колебаний лопатки диапазоны изменения величин указаны.
- 2) На рис. 7 б) для большей наглядности стоило отметить положения гиперболических и эллиптических точек.

7. Отзыв ПАО «РКК «Энергия» на автореферат.

Отзыв подписан доктором физико-математических наук, главным научным сотрудником ПАО «РКК «Энергия» Алексеевым Алексеем Кирилловичем. Отзыв положительный. В качестве замечания можно отметить неопределенность границ предлагаемого подхода по величине числа Рейнольдса.

Выбор официальных оппонентов обосновывается их компетентностью в области тем, затрагиваемых в диссертационном исследовании.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, профессор Черкасов Сергей Гелиевич работает главным научным сотрудником отделения

твердотопливных ракетных двигателей ГНЦ ФГУП «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша». Область научных интересов — математическое моделирование, гидроаэродинамика, теплообмен, двухфазные течения. Автор более 60 научных работ.

Официальный оппонент, кандидат физико-математических наук, Коротева Екатерина Юрьевна — старший научный сотрудник кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова». Область научных интересов — математическое моделирование, экспериментальные методы исследования аэрогидродинамических течений, волокнистые среды. Автор более 20 научных работ.

Выбор ведущей организации — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр» — обусловлен широким кругом проводимых научных исследований в области диссертационного исследования. Направления научной деятельности ФИЦ КазНЦ РАН и непосредственно отдела механики многофазных сред Института механики и машиностроения – обособленного структурного подразделения включают исследование двухфазных течений и математическое моделирование технологических систем.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **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.
- **исследовано** влияние на процесс перемешивания в установках колебательного типа амплитудно-частотных характеристик колеблющегося элемента, а также его геометрической формы.

- **построена** карта режимов в плоскости «эффективность перемешивания – потребляемая мощность».
- **построен** алгоритм оптимального размещения рабочих элементов.
- **определены** эффективные протоколы перемешивания в системе подвижных коаксиальных профилированных цилиндров и **построена** соответствующая карта режимов.
- **предложена** методика профилирования внутреннего цилиндра на основе анализа особых точек в векторном поле скорости жидкости.
- **найден** наиболее технологичный способ управления процессом перемешивания в системе подвижных коаксиальных цилиндров.
- **сформулированы** числа подобия для перемешивающих устройств двух различных классов. С помощью вычислительных экспериментов доказана их состоятельность.
- **разработаны** алгоритмы и построены редуцированные модели для ряда задач перемешивания с использованием разложений по динамическим модам. 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.

Теоретическая значимость исследования обоснована следующим:

- **разработана** математическая модель процессов перемешивания в жидких средах с волокнистыми включениями.
- на основе разложений по динамическим модам **построены** редуцированные модели гидродинамического перемешивания.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики. В диссертации были разработаны способы, которые позволяют находить эффективные схемы и режимы работы перемешивающих устройств. Сформулированы числа подобия, которые дают возможность осуществить

переход от лабораторных стендовых установок к реальным производственным аппаратам. Разработанный программный комплекс для построения конечномерных редуцированных моделей позволяет анализировать и экономично хранить информацию о поле течения, полученную не только в ходе расчета, но и в процессе физического эксперимента. Программный комплекс для моделирования динамики волокнистых включений в жидкости позволяет в деталях проследить процесс формирования структуры композитных материалов.

Достоверность результатов, полученных в ходе диссертационного исследования, обеспечивается физической объяснимостью полученных данных, сходимостью используемых численных методов, тестированием вычислительных алгоритмов, согласованностью результатов проведенных вычислительных экспериментов с аналитическими решениями и результатами других авторов, а также с качественными результатами физических экспериментов.

Личный вклад автора заключается в разработке алгоритмов и программных средств численного моделирования, адаптации математических моделей применительно к различным схемам перемешивания, проведении вычислительных экспериментов с последующим анализом результатов.

Диссертационный совет считает, что диссертационная работа Сухарева Тимура Юрьевича является самостоятельно выполненной, завершенной научно-квалификационной работой, в которой получены важные результаты в области механики жидкости, моделирования двухфазных течений, нелинейной волновой механики, вычислительных алгоритмов и программных комплексов. **Диссертация удовлетворяет пунктам 9-14 постановления Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. «О порядке присуждения ученых степеней».**

На заседании 20 декабря 2019 года протокол № 17 диссертационный совет принял решение присудить Сухареву Тимуру Юрьевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 9 докторов наук по специальности 01.02.05 — «Механика жидкости, газа и плазмы», участвовавших в заседании; из 21

человека, входящих в состав совета, проголосовали: за — 17, против — нет, недействительных бюллетеней — нет.

Председатель
Диссертационного совета Д 212.125.14,
д. ф.-м. н., профессор

П.С. Красильников

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 212.125.14,
к. ф.-м. н., доцент

В.Ю. Гидаспов

20 декабря 2019 г.

