



Государственная корпорация  
по космической деятельности «Роскосмос»

Государственный научный центр Российской Федерации –  
федеральное государственное унитарное предприятие

**«Исследовательский центр  
имени М.В.Келдыша»**

**(ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»)**

Онежская ул, д. 8, г. Москва, Россия, 125438  
Тел. +7 (495) 456-4608 Факс: +7 (495) 456-8228  
ОКПО 07547339 ОГРН 1027700482303 ИНН/КПП 7711000836/774301001  
kerc@elnet.msk.ru; http://www.kerc.msk.ru

Ученый совет МАИ

---

Волоколамское шоссе, д.4,  
г. Москва, А-80, ГСП-3, 125993

25.11.2019 № 48-24/31

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Направляю отзыв официального оппонента доктора физико-математических наук, профессора, главного научного сотрудника Государственного научного центра Российской Федерации – федерального государственного унитарного предприятия «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша» Черкасова Сергея Гелиевича 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».

Приложение: отзыв на 4-х листах, 2 экз.

Ученый секретарь  
кандидат военных наук

Ю.Л. Смирнов

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ

Вх. № 26 11 20 19

**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».**

**Актуальность темы диссертационного исследования.**

Диссертационная работа Сухарева Т.Ю. посвящена численному моделированию процесса гидродинамического перемешивания при ламинарном режиме течения. Такого рода задачи представляют большой интерес для многих практических приложений, таких как производство композитных материалов, битумов, суспензий, эмульсий и т.д. Для задач перемешивания, применительно к различным техническим устройствам и технологическим установкам, характерной особенностью является огромное разнообразие условий и факторов, влияющих на эффективность процесса. Поэтому, хотя гидродинамическое перемешивание и изучалось ранее, в настоящее время все еще остаются не изученными или малоизученными многие аспекты данного явления, что и определяет актуальность темы диссертации Т.Ю. Сухарева.

**Научная новизна.**

В диссертации получено множество новых научных результатов, из которых основными являются следующие:

1. Разработаны методы и программно-алгоритмические средства численного моделирования, позволяющие проводить предварительную оптимизацию схем и режимов работы установок для размешивания твердых частиц в жидкости.

2. Сформулированы критерии подобия для процессов перемешивания в системах колебательного типа и в системе коаксиальных профилированных цилиндров. Для этих задач на основе численного моделирования получены подробные данные по качественным и количественным характеристикам перемешивания в различных условиях.

3. Разработаны вычислительные алгоритмы и построены редуцированные модели для решения некоторых задач перемешивания на основе разложений по динамическим модам.

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ  
Вх. № 8  
26 11 2019

4. Сформулирована комплексная математическая модель для процесса перемешивания гибких волокон в жидкости. Разработан и верифицирован соответствующий программно-алгоритмический комплекс и продемонстрирована его применимость к задаче перемешивания в прямоугольной камере с подвижными границами.

#### **Практическая ценность.**

Практическая ценность диссертации состоит в том, что полученные в ней данные и сформулированные рекомендации могут использоваться в процессе проектирования перемешивающих аппаратов для выбора эффективных схем устройств.

#### **Достоверность.**

Научные положения и выводы диссертации являются достоверными, так как они получены при помощи программных средств, обеспечивающих согласование результатов вычислительных экспериментов с аналитическими решениями и данными экспериментов.

#### **Структура и содержание диссертации.**

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Материал изложен на 127 страницах и включает в себя текст, 74 рисунка и 3 таблицы. Список литературы содержит 141 наименование. Оформление диссертации соответствует требованиям, установленным правилам и стандартам.

В первой главе дается обзор литературы, посвященной изучению процессов гидродинамического перемешивания, и описывается используемая в диссертационной работе математическая модель.

Во второй главе подробно исследуется влияние различных факторов на процесс перемешивания в установках колебательного типа: частота и амплитуда колебаний рабочего элемента, его форма, пространственное расположение нескольких рабочих элементов. Математическая модель, используемая в ходе расчета, верифицируется путем сравнения с физическим экспериментом. Строится карта рабочих режимов, и вводятся безразмерные критерии.

В третьей главе детально рассматривается процесс перемешивания в системе подвижных профилированных соосных цилиндров. Изучается вопрос влияния периода протокола перемешивания на процесс, и определяются основные структуры в векторном поле скорости жидкости,

обеспечивающие интенсивное перемешивание. Демонстрируется способ избавления от застойных зон, посредством профилирования внутреннего цилиндра на основе анализа характерных структур в жидкости.

В четвертой главе описывается алгоритм разложений по динамическим модам. На основании данного алгоритма применительно к задачам смешения с использованием SVD усечения были построены конечномерные редуцированные модели процесса перемешивания. Показано, что данные редуцированные модели обеспечивают эффективное хранение информации о поле течения жидкости.

В пятой главе формулируется математическая модель процессов перемешивания в жидких средах с волокнистыми включениями. Проводится тестирование данной модели, реализованной в программном комплексе, путем сравнения с результатами других авторов и экспериментом. Формулируется задача о перемешивании в прямоугольной камере и исследуется влияние периода протокола перемешивания на равномерное распределение и ориентацию волокон в пространстве.

### **Апробация работы и публикации**

Результаты диссертационной работы докладывались на 7 международных конференциях и изложены в 5 публикациях в изданиях из перечня ВАК.

### **Замечания**

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 инструментальный использоваться в качестве основы для численного моделирования с учетом тех или иных дополнительных эффектов.

Указанные замечания не снижают общего положительного впечатления о диссертационной работе и носят рекомендательный характер.

### Заключение.

В целом, диссертация Т.Ю. Сухарева выполнена на высоком уровне, соответствующем ученой степени кандидата физико-математических наук. На основе численного моделирования в диссертации получены новые научные результаты в области процессов гидродинамического перемешивания применительно к различным технологиям.

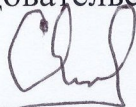
Тема и содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Автореферат и опубликованные работы в полной мере отражают содержание диссертации и полученные автором основные результаты.

Считаю, что диссертационная работа соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней (п. 9), утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор, Тимур Юрьевич Сухарев, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Доктор физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы, профессор, главный научный сотрудник отделения твердотопливных ракетных двигателей Государственного научного центра Российской Федерации – федерального государственного унитарного предприятия «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша»

21 ноября 2019 г.



Черкасов Сергей Гелиевич

Почтовый адрес: ул. Онежская, д. 8, г. Москва, Россия, 125438

Контактный телефон: +7 (495) 456-20-62

Адрес электронной почты: [sgcherkasov@yandex.ru](mailto:sgcherkasov@yandex.ru)

Подпись д. ф.-м. н., профессора Черкасова С.Г. удостоверяю:

Ученый секретарь

Государственного научного центра Российской Федерации – федерального государственного унитарного предприятия «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша», кандидат военных наук

  
Ю.Л. Смирнов

