



УТВЕРЖДАЮ  
ВРИО директора ИТ СО РАН  
член-корреспондент РАН  
Маркович Дмитрий Маркович

30 мая 2017 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук

Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук «Математическое моделирование волновых режимов течения пленок жидкости в вертикальных каналах» выполнена в Лаборатории проблем тепло- массопереноса №6.1 Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН.

В период подготовки диссертации соискатель Вожаков Иван Сергеевич работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук в лаборатории проблем тепло- массопереноса в должности инженера-исследователя и младшего научного сотрудника. В 2011 году окончил магистратуру Новосибирского государственного университета по направлению «физика». Соискатель проходил обучение в очной аспирантуре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук с 2011 по 2014 год. Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2017 году федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институтом теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук Архипов Дмитрий Григорьевич, старший научный сотрудник в лаборатории теоретической теплофизики №6.2 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

### **Актуальность темы**

Моделирование волновых течений является одной из фундаментальных проблем гидродинамики и теории нелинейных волновых процессов. Кроме этого двухфазные течения часто встречаются в природе и широко используются в различных областях техники. Поэтому поиск оптимальных параметров двухфазного течения играет решающую роль в проектировании различных энергетических установок. Так, обеспечение безопасной эксплуатации энергетических установок в настоящее время является актуальной задачей в атомной энергетике. Подход к проектированию, основанный на минимизации ущерба даже в случае тяжелой аварии, требует отдельных исследований. На сегодняшний день для реакторов с водяным теплоносителем есть хорошо зарекомендовавшие себя верифицированные модели, позволяющие предсказывать ход аварии, однако для реакторов на быстрых нейтронах (БН) таковые отсутствуют. Реакторы типа БН имеют свои отличительные особенности, поэтому для описания процессов в ходе аварии в таких реакторах требуется разработка новых моделей.



Как уже было сказано, зачастую в энергетических установках имеют место расслоенные двухфазные режимы течения, поэтому их изучение представляется весьма интересным не только с точки зрения фундаментальной науки, но и практического приложения. Так например, в настоящее время прямое численное моделирование двухфазных течений требует колоссальных вычислительных ресурсов, поэтому сегодня требуется разработка новых подходов к этому вопросу с учетом его особенностей. Немаловажным для практических приложений является задача устойчивости пленочного течения формирующегося под влиянием сильного газового потока. Изучение нелинейных волновых режимов имеет большое значение для определения оптимальных параметров течения в различных энергетических установках. Для решения этих задач необходимо создание новых математических моделей и развитие существующих вычислительных методов.

### **Цель работы**

Целью диссертационной работы является разработка новых моделей и развитие методов моделирования двухфазных течений. Основными задачами работы являются: разработка новых методов решения задачи о моделировании течения тонкой пленки жидкости; создание модели плавления и перемещения расплава оболочек ТВЭЛ с учетом особенностей хода тяжелой аварии в реакторах типа БН.

### **Личный вклад автора**

Диссертантом получены модельные уравнения, написаны программы для их решения, проведены теоретические и численные расчеты и обработаны результаты. Инвариантность модельных уравнений свободно-стекающей пленки жидкости показана совместно с Архиповым Д.Г. Диссертантом совместно с Архиповым Д.Г. разработаны программы для нахождения решений модельных уравнений. Диссертантом получена модель на четных полиномах Чебышева, проведен сравнительный линейный анализ, численные расчеты и обработаны результаты.

Постановка задачи о стекающей под действием сил гравитации и газового потока сформулирована совместно с Архиповым Д.Г. и Цвелодубом О.Ю. Диссертантом получено эволюционное уравнение на толщину пленки жидкости. Диссертантом получена новая модель обтекаемой газом пленки жидкости, учитывающая влияние вязких членов во втором порядке по параметру длинноволновости и проведены расчеты эволюции возмущений при умеренных числах Рейнольдса.

Представление совместных материалов согласовано с соавторами.

### **Достоверность**

Достоверность полученных результатов обеспечивается тем, что предложенные модели получены с помощью классических уравнений гидродинамики, физически обоснованных допущений и проверенных методов.

### **Научная новизна**

Впервые обнаружена инвариантность модельных уравнений для свободно стекающей пленки жидкости. Показано, что решения этой системы в расширенной области обладают симметрией. С использованием обнаруженной симметрии разработана новая модельная система уравнений галеркинско-го типа.

Получено новое эволюционное уравнение для описания слабонелинейных возмущений на пленке жидкости, обдуваемой спутным газовым потоком.

Получена новая система уравнений для моделирования при умеренных числах Рейнольдса стекающей пленки жидкости, обдуваемой газовым потоком, с учетом вязких членов второго порядка малости по параметру длинноволновости.

Разработана модель плавления и перемещения расплава оболочек ТВЭЛ в реакторах типа БН.

### **Научная и практическая ценность**



Обнаружена инвариантность в модельных уравнениях свободно-стекающей пленки жидкости, что позволило существенно сократить время расчета эволюции стекающей пленки жидкости.

В результате анализа моделей трения пленки с газом, расчета типичных сценариев эволюции обдуваемой газом пленки и сопоставления результатов расчета с экспериментальными данными были выявлены сильные и слабые стороны квазистационарных моделей трения пленки с газом, а также выработаны рекомендации по использованию этих моделей при расчете эволюции.

Результаты настоящей работы по изучению обдуваемой газом пленки жидкости значительно сужают круг возможных гипотез, объясняющих природу вторичной неустойчивости.

Разработанные модели плавления и перемещения расплава оболочек твэл в реакторах типа БН могут быть использованы для обоснования безопасности разрабатываемых реакторов при анализе начальных этапов тяжелых аварий.

#### **Основные публикации автора по материалам диссертации**

1. I.S. Vozhakov, D.G. Arkhipov, O.Yu. Tselodub. Simulating the nonlinear wave mode evolution in the problem of the falling thin layer of a viscous liquid // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. Vol. 754. – P. 032022-6. (Из списка ВАК)

2. D. Arkhipov, I. Vozhakov, D. Markovich, O. Tselodub. Symmetry in the problem of wave modes of thin viscous liquid layer flow // European Journal of Mechanics / B. – 2016. Vol. 59. – P. 52-56. (Из списка ВАК)

3. Vozhakov, A. Cherdantsev, D. Arkhipov. Modelling secondary instability of co-current gas-sheared thin film // Fluid Dynamics Research. – 2016. Vol. 48, No. 6. – P. 061420. (Из списка ВАК)

4. Архипов Д.Г., Вожаков И.С., Маркович Д.М., Цвелодуб О.Ю. Симметрия в задаче о течения тонкого слоя вязкой жидкости. // Доклады академии наук. – 2016. – Т. 466, № 5. – С. 541–544. (Из списка ВАК)

5. Вожаков И.С., Архипов Д.Г., Цвелодуб О.Ю. Моделирование нелинейных волн на поверхности тонкой пленки жидкости, увлекаемой турбулентным потоком газа // Теплофизика и аэромеханика. Т.22, №2, 2015. – С. 201-212. (Из списка ВАК)

6. Вожаков И.С., Усов Э.В., Жданов В.С., Кузнецова М.Е., Кисилев А.Е., Чалый Р.В. Моделирование плавления оболочки твэл и перемещения расплава в ТВС реакторов типа БН кодом СОКРАТ-БН // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 2015. – Т.4. – С. 15-21.

7. Вожаков И.С., Цвелодуб О.Ю., Архипов Д.Г. Исследование нелинейных волн на стекающей тонкой пленке жидкости, увлекаемой потоком турбулентным спутным потоком газа // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии, №1(14), 2014, с.75-81.

8. Архипов Д.Г., Вожаков И.С., Маркович Д.М., Цвелодуб О.Ю. Симметрия в задаче о волновых режимах течения тонкого слоя вязкой жидкости // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии, №1(14), 2014, с.109-114.

#### **Апробация работы**

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: Всероссийская научная конференция "Теплофизика и физическая гидродинамика" с элементами школы молодых ученых (Ялта, 18-26 сентября 2016); Всероссийская конференция "XXXII Сибирский теплофизический семинар" (Новосибирск, 19–20 ноября 2015); XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 20-24 августа 2015); «Фундаментальные основы МЭМС- и



нанотехнологий» (Новосибирск, 15-18 июня 2015); Всероссийская школа-конференция молодых учёных с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2014); «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Алушта, 2014); 5-ая Всероссийская конференция с участием зарубежных ученых «Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения» (Бийск, 2014); Конференция молодых ученых «Новые нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (Новосибирск, 2013); Международная конференция «Математические и информационные технологии, MIT-2013» (Врнячка Баня, Сербия, Будва, Черногория, 2013).

#### **Решение о рекомендации работы к защите**

Диссертация Вожакова И.С. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержащую новые методы решения актуальных задач. Работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Семинар считает, что результаты работы, её объём и изложение соответствуют всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Диссертация «Математическое моделирование волновых режимов течения пленок жидкости в вертикальных каналах» Вожакова Ивана Сергеевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Заключение принято на заседании семинара Отдела физической гидродинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук под руководством д.ф.-м.н. Алексеенко С.В. Присутствовало на заседании 18 чел., в том числе 1 академик РАН, 8 докторов и 6 кандидатов наук. Результаты голосования: «за» - 18 человек, «против» - 0, «воздерж.» - 0, протокол № 8 от «08» ноября 2016 г.

Председатель семинара  
доктор физико-математических наук  
академик РАН  
Алексеев Сергей Владимирович

Секретарь семинара  
кандидат технических наук  
Кабардин Иван Константинович