

УТВЕРЖДАЮ



Зам. директора по научной
работе, к.ф.-м.н. А.В. Бильский

2026 г.

М.П.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ТЕПЛОФИЗИКИ ИМ С.С.КУТАТЕЛАДЗЕ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

По диссертации Михайлова Арсения Владимировича «экспериментальные исследования нестационарных свободноконвективных пограничных слоев на вертикальных стенках» на соискание ученой степени кандидата наук по научной специальности 1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника. Диссертация выполнена в Лаборатории интенсификации процессов теплообмена (6.6.).

В 2022 г. соискатель ученой степени окончил магистратуру ФЛА НГТУ по направлению подготовки 24.04.04 Авиастроение. В период с 01.09.22 г. по 29.08.26 г. обучается в аспирантуре ИТ СО РАН.

Научный руководитель: Бердников Владимир Степанович, ИТ СО РАН, Лаборатория интенсификации процессов теплообмена, д.-ф.м.н., г.н.с.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

1. Актуальность темы

Подавляющее большинство современных технических систем, включая топливные баки авиационной и ракетно-космической техники, а также расплавы в тиглях, изготовленных из различных материалов (кварца, платины, молибдена и других), используемые при выращивании монокристаллов, функционируют в условиях периодического или непрерывного нагрева и охлаждения ограничивающих стенок. Для подобных систем характерно протекание сложных процессов сопряжённого конвективного теплообмена, реализующихся как при нестационарных (переходных), так и при стационарных (установившихся) граничных условиях. Особенностью таких процессов является наличие свободных неизотермических поверхностей жидкостей, вследствие чего

конвективное течение приобретает тепловую гравитационно-капиллярную природу. При этом структура течения вблизи свободной поверхности и во всём объёме жидкости существенно зависит от режимов теплообмена с окружающей средой, интенсивности теплоподвода, а также геометрических особенностей рассматриваемой системы. От характера протекания переходных тепловых процессов в значительной степени зависят как ресурс и надёжность эксплуатации авиационно-космической техники, так и качество получаемых монокристаллических изделий, определяющее их дальнейшее практическое применение.

Дополнительная сложность рассматриваемой проблемы связана с тем, что на стенках различной ориентации относительно вектора силы тяжести при стационарных и нестационарных режимах теплообмена формируются пограничные слои сложной структуры. В этих слоях могут возникать ламинарно-турбулентные переходы, сопровождающиеся развитием нестационарных вторичных течений различной интенсивности и пространственной формы. Подобные явления оказывают существенное влияние на процессы тепломассообмена, однако в настоящее время они изучены недостаточно полно, особенно в рамках сопряжённой нестационарной постановки задачи. Для однофазных течений жидких сред именно режимы теплообмена определяют формирование нестационарных температурных полей, распределений тепловых потоков и градиентов температуры как в самой жидкости, так и в ограничивающих её конструктивных элементах или массивных твёрдых телах.

Особое значение имеют данные о временной эволюции полей температуры и температурных градиентов в стенках, поскольку они являются необходимой исходной информацией для расчёта термических напряжений и оценки долговечности конструкций. В технологических процессах, сопровождающихся плавлением или кристаллизацией вещества, режимы конвективного теплообмена оказывают определяющее влияние на форму и устойчивость фронтов кристаллизации, распределение температуры в твёрдой и жидкой фазах, а также на формирование внутренней структуры материала. При выращивании монокристаллов одной из наиболее актуальных задач является максимальное снижение уровня термических напряжений, способных приводить к возникновению дефектов и ухудшению эксплуатационных характеристик готовой продукции.

Важную роль в указанных процессах играют амплитудно-частотные характеристики температурных пульсаций, обусловленные возникновением и развитием вторичных течений в пограничных слоях. Такие пульсации оказывают влияние не только на локальные мгновенные процессы кристаллизации, но и на изменение температурных

полей в твёрдых телах и на обтекаемых поверхностях. В полостях, частично заполненных жидкостью, при наличии неизотермической свободной поверхности наряду с силами плавучести существенное влияние на структуру течения и теплообмен могут оказывать термокапиллярные силы. Возникающий при этом термокапиллярный эффект, или эффект Марангони, способен существенно изменять характер движения жидкости, интенсивность переноса тепла и особенности формирования температурных полей.

В связи с этим особую научную и практическую значимость приобретают фундаментальные исследования нестационарного сопряжённого теплообмена в условиях существенного влияния сил плавучести, а также при их совместном действии с термокапиллярными силами. Не менее важным является изучение процессов тепло- и массопереноса, сопровождающихся фазовыми переходами, поскольку результаты таких исследований позволяют совершенствовать существующие технологии, повышать надёжность технических систем и обеспечивать получение материалов с заданными свойствами и высоким уровнем качества.

2. Цели работы

- Исследовать развитие нестационарной термогравитационной и тепловой гравитационно-капиллярной конвекции в прямоугольных полостях в режимах внезапного и монотонного разогрева одной из вертикальных стенок;
- Экспериментально исследовать развитие пограничных слоев, образующихся на разогреваемых и охлаждаемых вертикальных стенках;
- Исследовать развитие пограничного слоя на охлаждаемой стенке в режимах однофазного течения жидкости и при наличии кристаллизации;
- Изучить влияние набегающего потока на форму фронта кристаллизации;
- Исследовать влияние набегающего потока нагретой жидкости на поля температуры в тонкой металлической стенке

3. Научная новизна основных положений, результатов и выводов, полученных в диссертации

Новизна обусловлена практически полным отсутствием экспериментальных данных о развитии свободноконвективных пограничных слоев на вертикальных стенках плоских слоев в условиях монотонного разогрева и охлаждения стенок в режимах с ламинарно-турбулентным переходом. Существующие исследования проведены только в узких диапазонах параметров. Исследования сопряженного свободноконвективного теплообмена трудоемки, тем более в сочетании с плохо изученными процессами

ламинарно-турбулентного перехода, поэтому исследования такого рода в современной научной литературе весьма редки.

4. Теоретическая и практическая значимость работы:

Теоретическая значимость работы заключается в расширении представлений о механизмах нестационарного сопряженного конвективного теплообмена, о закономерностях развития пограничных слоев на вертикальных стенках, а также о взаимосвязи между структурой течения, температурными полями в стенках и процессами кристаллизации.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования полученных результатов:

- при расчете теплового состояния и термических напряжений в тонкостенных резервуарах и топливных баках летательных аппаратов;
- при совершенствовании методов расчета сопряженного теплообмена в системах, частично заполненных жидкостями;
- при разработке и оптимизации технологий выращивания монокристаллов методом горизонтальной направленной кристаллизации;
- при верификации численных моделей нестационарного сопряженного теплообмена при наличии фазовых переходов.

5. Степень достоверности результатов

Достоверность полученных результатов обеспечена использованием современного, откалиброванного оборудования при получении экспериментальных данных, результатов экспериментов, анализом погрешностей. Экспериментальные методики предварительно тестировались и сравнивались как с результатами модельных экспериментов, так и с результатами, полученными численно. Тепловизионные измерения полей температуры сопоставлялись с измерениями термопарами.

6. На защиту выносятся:

- 1) Результаты исследований развития нестационарной термогравитационной и тепловой гравитационно-капиллярной конвекции в прямоугольной полости в режимах

внезапного и монотонного разогрева одной из вертикальных стенок при плотности теплового потока $q = 1500 \dots 7500 \text{ Вт/м}^2$

2) Результаты исследования влияния набегающего потока нагретой жидкости на поля температуры в тонкой металлической стенке, расчет данных об амплитудно-частотных характеристиках пульсаций температуры, в набегающем потоке на внутреннюю поверхность стенки и проникающих на внешнюю сторону стенки.

3) Результаты исследований развития нестационарных пограничных слоев на стенках в случае однофазных течений, а также при наличии кристаллизации на охлаждаемой вертикальной стенке, эволюции формы фронта кристаллизации при перепадах температуры от 5 до 40 К между вертикальными стенками полости и при высотах слоя жидкости от 8 до 105 мм.

7. Личный вклад автора

Основные научные результаты, включенные в материалы диссертации, получены соискателем лично. Вклад автора состоял в создании рабочих участков, подготовке и проведении всех представленных в работе экспериментов, калибровке и настройке оборудования, обработке и анализе результатов, подготовке публикаций и докладов на конференциях. Постановка задач исследований и анализ полученных результатов выполнены совместно с научным руководителем д.ф.-м.н. Бердниковым Владимиром Степановичем.

8. Список работ автора по тематике диссертации, опубликованных в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях (в т.ч. рекомендованных ВАК):

1. А.В. Михайлов, В.С. Бердников, В.А. Гришков, Н.М. Рыбин, Е.А. Юровских.
Влияние интенсивности тепловой гравитационно-капиллярной конвекции на поля температуры в тонких стенках // Теплофизика и аэромеханика. – 2026. – Т. 33, № 1. – С. 61. – DOI: 10.63430/TIA202601006/
2. A. V. Mikhaylov et al. Experimental research of the process of crystallization front propagation from a cooled vertical side in a horizontal fluid layer //EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019. – Т. 196. – С. 00035.
3. V. S. Berdnikov, V. A. Grishkov, A. V. Mikhajlov. Experimental studies of the evolution of non-stationary natural convective boundary layers at different heat flux densities on a

- vertical wall // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1677. – №. 1. – С. 012181. – DOI: 10.1088/1742-6596/1677/1/012181
4. A. V. Mikhaylov, V. A. Grishkov, V. S. Berdnikov Dependence of the temperature fields of a thin vertical wall on the intensity of the oncoming flow of a heated liquid // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1867. – №. 1. – С. 012040. – DOI: 10.1088/1742-6596/1867/1/012040
5. N. I. Bodneva et al. Influence of thermal gravitational-capillary convection on temperature fields in a thin wall // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 2119. – №. 1. – С. 012162. – DOI: 10.1088/1742-6596/2119/1/012162

9. Апробация работы:

Результаты, представленные в диссертации, обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях:

1. XX Международная молодежная конференция по люминесценции и лазерной физике, посвященной 30-летию со дня образования Иркутского филиала Института лазерной физики СО РАН (Пленарный доклад)
2. X всероссийская конференция, посвященная 125-летию со дня рождения академика Михаила Алексеевича Лаврентьева «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике» (Устный доклад)
3. Всероссийская конференции с международным участием «XLI Сибирский теплофизический семинар», посвященной 75-летию академика РАН С. В. Алексеенко (Стендовый доклад)
4. 62-я Международная научная студенческая конференция 2024 г. (МНСК-2024) (Устный доклад)
5. Всероссийская конференция «Математические проблемы механики сплошных сред», посвященная 105-летию со дня рождения академика Л. В. Овсянникова (Устный доклад)

10. Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите

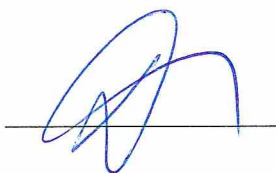
Диссертация соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842.

11. Решение о рекомендации к защите

Диссертация Михайлова Арсения Владимировича «Экспериментальные исследования нестационарных свободноконвективных пограничных слоев на вертикальных стенках» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Настоящее заключение подготовлено на основании решения Секции 2 Ученого совета ИТ СО РАН по научному направлению «Термогазодинамика и турбулентность».

Присутствовало на заседании 13 человек, в том числе 8 докторов наук, 5 кандидатов наук.



Заместитель председателя Секции 2 Ученого
совета ИТ СО РАН
к.ф.-м.н. Сиковский Д.Ф



Секретарь
к.ф.-м.н. Наумкин В.С.

«16» июня 2026 г.