

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТ СО РАН

член-корр. РАН

Дмитрий Маркович Маркович



« 24 » мая 2018 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Диссертация «Влияние термокапиллярных эффектов на характеристики течения нагреваемой пленки жидкости» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук выполнена в Лаборатории интенсификации процессов теплообмена Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

В период подготовки диссертации соискатель Шатский Евгений Николаевич работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук в должности младшего научного сотрудника.

В 2011 г. Шатский Евгений Николаевич окончил магистратуру Новосибирского государственного университета по специальности «физика кинетических явлений».

Соискатель проходил обучение в очной аспирантуре ИТ СО РАН с 2011 по 2014 год. Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника выдано в 2014 г. Институтом теплофизики СО РАН.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, Чиннов Евгений Анатольевич работает в должности главного научного сотрудника лаборатории интенсификации процессов теплообмена Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

Цель работы:

Экспериментальное исследование формирования термокапиллярных структур и их взаимодействие с волнами на поверхности стекающей нагреваемой пленки жидкости при малых и умеренных числах Рейнольдса ($Re < 33$).

Актуальность исследования.

Течения тонких пленок жидкости реализуются во многих технологических процессах и установках разного назначения. Спектр практических приложений пленочных течений непрерывно расширяется, что стимулирует проведение новых экспериментальных и теоретических исследований этого класса течений. Пленки определяют режим теплопередачи в оросительных градирнях, абсорберах, скрубберах, ректификационных колоннах, испарителях, конденсаторах, аппаратах химической технологии, при движении парожидкостных смесей в трубах. Пленочные течения применяются в энергетике, в химической, фармацевтической и пищевой промышленности. Важной характеристикой таких течений является их волновая структура, влияющая как на процессы переноса, так и на режимные особенности течения. Существующие зависимости описывают теплообмен и разрыв в пленках жидкости без учета сильных термокапиллярных эффектов, что справедливо при относительно малых плотностях тепловых потоков. Промышленные аппараты работают при малых тепловых нагрузках из-за ограничений, связанных с возможным разрывом пленочного течения, появлением и распространением сухих пятен, развитием кризисных явлений, приводящих к резкому ухудшению теплоотдачи, выходу оборудования из строя и ухудшения качества продукции. В связи с этим для широкого круга технических приложений важное значение имеет понимание гидродинамики и теплообмена в стекающих пленках жидкости.

Личный вклад.

Вклад автора в исследования состоял в проведении серии экспериментов в составе научного коллектива, в самостоятельной разработке и тестировании комплекса численных алгоритмов для анализа базы данных измерений, самостоятельной обработке экспериментальных данных и интерпретации результатов, а также подготовке статей и докладов на конференциях и для публикации в рецензируемых журналах.

Поставлены и решены следующие задачи:

1. Исследование влияния условий нагрева на формирование термокапиллярных структур и границы их существования.
2. Исследование влияния термокапиллярных сил на волновое течение пленки жидкости.
3. Исследование влияния взаимодействия волн с термокапиллярными структурами на параметры течения: деформацию пленки жидкости, формирование ривулетов, амплитуду и скорость волн и образование первого устойчивого сухого пятна.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных методов диагностики, анализом неопределенностей измерений, проведением калибровочных и тестовых измерений. Выбранные экспериментальные режимы характеризуются хорошей воспроизводимостью и согласуются с результатами работ других авторов.

Научная новизна.

1. Впервые были зафиксированы термокапиллярные структуры, формирующиеся при малых градиентах температуры на поверхности пленки жидкости (тип Б), в условиях безволнового течения при малых значениях чисел Рейнольдса ($Re = 0,1-5$). Показано, что они отличаются по своим характеристикам от ранее обнаруженных термокапиллярных структур, формирующихся в условиях высоких градиентов температуры на поверхности пленки (тип А), и не связаны с трехмерным волновым течением.
2. Установлено, что структуры типа Б реализуются при малых числах Марангони в условиях малых значений градиентов температуры на поверхности пленки в широком диапазоне изменения числа Рейнольдса и физических свойств жидкости (числа Капицы). Поперечный размер структур (расстояние между струями) определяется капиллярной постоянной и не зависит ни от вязкости жидкости, ни от расхода (чисел Марангони, Капицы и Рейнольдса пленки).
3. С использованием скоростной инфракрасной камеры выполнено экспериментальное исследование воздействия периодических искусственных возмущений на нагреваемую пленку жидкости при малых числах Рейнольдса. Показано, что развитие инициированных возмущений с длиной волны близкой к длине волны термокапиллярных структур типа А приводит к перемещению струй и воздействует на

контактную линию, ограничивающую сухое пятно. Установлено, что искусственные возмущения при достаточно высоких тепловых потоках оказывают существенное влияние на изменение структуры течения и повторное орошение сухих зон.

4. Показано, что вследствие действия термокапиллярных сил на поверхности происходит деформация трехмерных волн и переход к струйному течению. При движении крупных волн деформация фронта волны начинается в области, примыкающей к наиболее нагретой зоне остаточного слоя пленки (между формирующимися струями). Далее, по мере прохождения волны вдоль нагревателя, деформация распространяется вглубь волны, разделяя ее на струи. При движении волн среднего размера термокапиллярные силы изменяют расстояние между их гребнями, приводя в соответствие с расстоянием между формирующимися структурами в остаточном слое.
5. Впервые проведено исследование взаимодействия трехмерных волн с термокапиллярными структурами двух типов, в результате которого установлено, что при достижении высокого градиента температуры на передней кромке нагревателя течение плёнки меняет характер. Показано что вследствие такого взаимодействия:
 - происходит рост деформации пленки и амплитуды волн,
 - расстояние между струями изменяется вдоль нагревателя,
 - возникает зигзагообразное движение струй.
6. Обнаружено, что в результате взаимодействия волн с термокапиллярными структурами возрастает значение плотности теплового потока, соответствующего появлению первого устойчивого сухого пятна. Впервые обнаружен новый метод воздействия на пленочное течение, приводящий к повышению его устойчивости к разрыву. Результат является важным, так как обнаруженный способ повышения устойчивости пленок жидкости может быть использован в промышленных установках.

Теоретическая значимость.

Полученные новые фундаментальные знания о закономерностях формирования термокапиллярных структур, а также о воздействии термокапиллярных сил на волновое течение пленки жидкости, являются полезными для широкого круга технических приложений, важное значение в которых имеет понимание гидродинамики и теплообмена в стекающих пленках. Продемонстрирован способ повышения устойчивости пленок жидкости к разрыву, который может быть использован в промышленных установках.

Практическая значимость.

Диссертация Е.Н. Шатского представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержащую новые методы решения актуальных задач экспериментальной науки. Работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук. Семинар считает, что результаты работы, её объём и изложение соответствуют всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Основные публикации автора по материалам диссертации

В журналах из перечня ВАК

1. Shatskii E.N., Chinnov E.A., Zaitsev D.V., Semenov A.A., Kabov O.A. «The Effect of Liquid Viscosity on the Formation of Thermocapillary Structures»// Technical Physics Letters. – 2017. – Vol. 43, № 12. – P. 1080-1083.
2. С.П. Актершев, Е.Н. Шатский, Е.А. Чиннов Формирование термокапиллярных структур в нагреваемой пленке жидкости// Теплофизика и аэромеханика. – 2017. – Т. 24, № 5. – С. 759 – 769.
3. Чиннов Е.А., Шатский Е.Н. «Распад крупных естественно образующихся волн в нагреваемой пленке жидкости»// Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42, № 19. – С. 46 - 54.
4. Е. Н. Шатский, Е. А. Чиннов «Синхронное измерение полей толщин и температур в стекающей нагреваемой пленке жидкости»// Теплофизика высоких температур. – 2016. – Т. 54, № 6. – С. 965–968.
5. Е.А. Чиннов, Е.Н. Шатский «Термокапиллярные неустойчивости в стекающей пленке жидкости при малых числах Рейнольдса»// Письма в ЖТФ. – 2014. – Т. 40, № 1. – С. 16-23.
6. Е.А. Чиннов, Е.Н. Шатский «Воздействие на контактную линию посредством искусственных возмущений в неизотермической пленке жидкости» // Теплофизика высоких температур. – 2014. – Т. 52, № 3. – С. 477 – 480.
7. Е.А Чиннов, Е.Н. Шатский, О.А. Кабов «Эволюция температурного поля на фронте трехмерной волны в нагреваемой пленке жидкости» // Теплофизика высоких температур. – 2012. - Т. 50. - № 1. - С.1-8.

8. Е.А. Чиннов, Е.Н. Шатский «Развитие искусственных возмущений в неизотермической пленке жидкости» // Теплофизика высоких температур. – 2011. - Т. 49. - № 5. - С. 1-6.
9. Чиннов Е.А., Шатский Е.Н. «Управление взаимодействием гидродинамических волн с термокапиллярной неустойчивостью в стекающей пленке жидкости» // Письма ЖТФ. – 2010. – Т. 36. - № 17. - С. 61-68.
10. Чиннов Е.А., Шатский Е.Н. «Воздействие термокапиллярных возмущений на волновое движение нагреваемой пленки жидкости» // Письма ЖТФ. – 2010. – Т. 36. - № 2. - С. 7-17.
11. Shatskiy E., Chinnov E. «Thermocapillary rupture in falling liquid films at moderate Reynolds numbers» // EPJ Web of Conferences. – 2017. Vol. 159. - № 0055.
12. Evgeniy Shatskiy, Yuliya Koemets, Evgeny Chinnov «The waves amplitudes increase due to interacting with thermocapillary structures» MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 84. - № 00036.
13. В материалах конференций:
14. Шатский Е. Н. «Взаимодействие гидродинамических и термокапиллярных возмущений в нагреваемой пленке жидкости» // Сб. Трудов. 18 международной студенческой конференции “Студент и научно-технический прогресс”, Новосибирск, Россия, 11 – 15 апреля. - 2009. - С. 57.
15. Шатский Е.Н., Чиннов Е.А. «Эволюция трехмерных гидродинамических возмущений в термокапиллярные на поверхности пленки жидкости» // Сб. Трудов. 7 конф. “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики”, Алушта, Украина, 21 - 25 сентября. - 2009. - С. 60-61.
16. Чиннов Е. А. Шатский Е.Н. «Неустойчивость волновой стекающей пленки жидкости к термокапиллярным возмущениям» // Сб. трудов всероссийской научно-практической конференции "Теплофизические основы энергетических технологий", Томск, Россия, 24-26 июня. - 2010. – С. 71-74.
17. Шатский Е.Н., Чиннов Е.А. “Управление образованием регулярных структур в нагреваемой пленке жидкости” // Сб. Трудов. 8 конф. “Актуальные вопросы

- теплофизики и физической гидрогазодинамики", Алушта, Украина, 20-26 сентября. - 2010. – С. 123-127.
18. Чиннов Е.А., Шатский Е.Н. «Взаимодействие гидродинамических волн с термокапиллярной неустойчивостью в стекающей пленке жидкости» // Труды Пятой Российской национальной конференции по теплообмену, Москва, Россия, 25-29 октября. - 2010. - Т. 5. – С. 119-122.
 19. Шатский Е.Н. "Воздействие внешних возмущений на волновое движение нагреваемых пленок жидкости" // Сб. трудов XI Всероссийской школы-конференции молодых ученых "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики", Новосибирск, Россия, 17-19 ноября. – 2010. – С. 100.
 20. Шатский Е. Н. «Влияние градиента температуры на волновое движение пленок жидкости» // Сб. Трудов. 49 международной студенческой конференции "Студент и научно-технический прогресс", Новосибирск, Россия, 16 – 20 апреля. – 2011. – С. 69.
 21. Шатский Е.Н. «Деформация трехмерных волн при течении пленки по нагреваемой поверхности» // Сб. трудов XVIII школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в новых энергетических технологиях», Звенигород, Россия, 23-27 мая. – 2011. – С. 227.
 22. Шатский Е.Н., Чиннов Е.А. «Воздействие термокапиллярных эффектов на волновое движение пленок жидкости» // Сб. трудов 4 всероссийской конференции с участием зарубежных ученых "Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения", Бийск, Россия, 5-10 июля. – 2011. – С. 98-99.
 23. E. A. Chinнов, E. N. Shatskii and O. A. Kabov «Interaction of Thermocapillary and Wave Instabilities in Heated Falling Liquid Film» Sixth International Topical Team Workshop on two-phase systems for ground and space applications, Cava de' Tirreni, Italy, September 25-28. - 2011.
 24. E. Shatskiy, E. Chinнов and O. Kabov «Thermocapillary Instabilities in Heated Falling Liquid Film» Book of abstracts Seventh International Symposium on two-

- phase systems for ground and space applications, Beijing, China, September 17–21. – 2012. – P. 77.
25. Шатский Е.Н. «Термокапиллярные неустойчивости в стекающих пленках жидкости» // Сб. трудов Всероссийской конференции молодых ученых «Новые нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», Новосибирск, Россия, 3 – 4 октября. – 2013. – С. 53.
26. E.N. Shatskiy, E.A. Chinnov, D.M. Markovich, V.V. Guzanov, O.A. Kabov «Wave and temperature characteristics of the heated falling liquid films» // Abstract of ISHM-II, Novosibirsk, Russia, 20–21 May. – 2015. – P. 27.
27. Шатский Е.Н., Коэмец Ю.А., Чиннов Е.А. «Разрыв стекающей пленки жидкости при взаимодействии волн с термокапиллярными структурами» // Тезисы докладов Всероссийская конференция «XXXII Сибирский теплофизический семинар», Новосибирск, Россия, 19–20 ноября. – 2015. – С. 147
28. Evgeniy Shatskiy, Yuliya Koemets, Evgeny Chinnov «The waves amplitudes increase due to interacting with thermocapillary structures» // Abstract of International Symposium and School for Young Scientists Interfacial Phenomena and Heat Transfer, Novosibirsk, Russia, 2–4 of March. – 2016. – P. 80

Апробация работы.

По результатам работы имеется 12 статей, из них 12 из перечня ВАК. Также работа апробирована на 15 конференциях, из них 4 зарубежных и 11 российских.

Полнота работы:

Диссертация «Влияние термокапиллярных эффектов на характеристики течения нагреваемой пленки жидкости» Шатского Евгения Николаевича является завершенной научно-исследовательской работой, содержащей новые результаты в области пленочных течений при существенном влиянии термокапиллярных эффектов

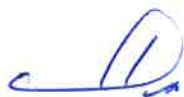
Решение о рекомендации работы к защите

Диссертация «Влияние термокапиллярных эффектов на характеристики течения нагреваемой пленки жидкости» Шатского Евгения Николаевича рекомендуется к защите по специальности **01.04.14 «теплофизика и теоретическая теплотехника»** на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

Заключение принято на расширенном заседании Отдела физической гидродинамики ИТ СО РАН под председательством академика РАН д.ф.-м.н. Алексеенко С.В. Присутствовали на заседании 20 чел., из них 1 член корреспондент, 6 докторов наук, 5 кандидатов наук.

Результаты открытого голосования по вопросу о принятии заключения по диссертации Шатского Е.Н.: за – 20, против – 0 воздержались – 0. Протокол № 6 от 24 мая 2018 г.

Председатель семинара
академик РАН



Сергей Владимирович Алексеенко

Секретарь семинара
к.т.н.



Кабардин Иван Константинович