

На правах рукописи



ШАТСКИЙ Евгений Николаевич

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНЫХ ЭФФЕКТОВ
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЧЕНИЯ
НАГРЕВАЕМОЙ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ**

01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

НОВОСИБИРСК - 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук ФАНО России в Лаборатории интенсификации процессов теплообмена.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
Чиннов Евгений Анатольевич

Официальные оппоненты:

Стрижак Павел Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», исполняющий обязанности руководителя лаборатории моделирования процессов тепломассопереноса

Бекежанова Виктория Бахытовна, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», ведущий научный сотрудник

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь.

Защита состоится “5” декабря 2018 года в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 003.053.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, в конференц-зале.

Отзывы в двух экземплярах, оформленные в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просьба отправлять по адресу: Институт теплофизики СО РАН, просп. Акад. Лаврентьева, 1, г. Новосибирск, 630090. dissovet@itp.nsc.ru

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Института теплофизики СО РАН и на официальном сайте в сети “Интернет” – [http://: www.itp.nsc.ru](http://www.itp.nsc.ru).

Автореферат разослан “_____” “_____” 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д. ф.-м. н., профессор



Кузнецов Владимир Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Течения тонких пленок жидкости реализуются во многих технологических процессах и установках разного назначения. Спектр практических приложений пленочных течений непрерывно расширяется, что стимулирует постановку и 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 вынуждены работать 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.

Цель исследования – экспериментальное исследование формирования термокапиллярных структур и их взаимодействие с волнами на поверхности стекающей нагреваемой пленки жидкости при малых и умеренных числах Рейнольдса ($0.1 < Re < 50$).

Научные 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.

Научная новизна изложенных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

1. Впервые структуры типа Б были зафиксированы 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 типа А и не связаны с гидродинамическим 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) не зависит ни от вязкости жидкости, ни от расхода (чисел Марангони, Капицы и Рейнольдса пленки).

3. Выполнено экспериментальное исследование воздействия периодических искусственных возмущений на нагреваемую пленку жидкости при малых числах Рейнольдса. Показано, что развитие инициированных термокапиллярных возмущений 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 солитонобразных 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 с использованием синхронного измерения полей температуры и толщины проведено исследование взаимодействия трехмерных волн с термокапиллярными структурами двух типов, в результате которого установлено, что при достижении высокого градиента температуры на поверхности пленки жидкости в области передней кромки нагревателя течение пленки 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 и практическая 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. Продемонстрированный способ повышения устойчивости пленок жидкости к разрыву может быть использован в промышленных установках.

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

Защищаемые результаты

1. Результаты экспериментального исследования влияния градиента температуры на поверхности нагрева на формирование термокапиллярных структур.
2. Результаты исследования взаимодействия волн с термокапиллярными структурами в условиях различных градиентов температуры.
3. Результаты исследования влияния взаимодействия волн с термокапиллярными структурами на разрыв.

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

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на: международных конференциях (7 конференция “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики 21 - 25 сентября 2009 г. Алушта, Украина, 8 конференция “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики 20-26 сентября 2010 г. Алушта, Украина, Sixth International Topical Team Workshop on two-phase systems for ground and space applications, Cava de’ Tirreni, Italy, September 25-28, 2011, Seventh International Symposium on two-phase systems for ground and space applications, Beijing, China, September 17-21, 2012, II International Seminar with involvement of young scientists (scientific school) (ISHM-II), 20-21 May 2015, Novosibirsk) и Всероссийских конференциях (18 международная студенческая конференция “Студент и научно-технический прогресс”, 11 – 15 апреля 2009. г. Новосибирск, всероссийская научно-практическая конференция “Теплофизические основы энергетических технологий 24-26 июня 2010, г. Томск, Пятая Российская национальная конференция по теплообмену, 25-29 октября 2010, г. Москва,

XI Всероссийская школа-конференция молодых ученых “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики”, 17-19 ноября 2010 г. Новосибирск, 49 международная студенческая конференция “Студент и научно-технический прогресс”, 16 – 20 апреля 2011. г. Новосибирск, XVIII школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в новых энергетических технологиях», 23-27 мая 2011г., г. Звенигород, 4 всероссийская конференция с участием зарубежных ученых “Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения”, 5-10 июля, Бийск, Всероссийская конференция молодых ученых «Новые нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», 3 – 4 октября 2013 г. Новосибирск, Всероссийская конференция «XXXII Сибирский теплофизический семинар», Новосибирск, 19–20 ноября 2015).

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 27 печатных изданиях, 12 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 15 — в тезисах докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 111 страниц с 75 рисунками и 2 таблицами. Список литературы содержит 101 наименование.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (14.616.21.0016, 14.613.21.0067, 14.613.21.0038, 14.613.21.0011, 14.604.21.0053, 14.132.21.1357), Министерства образования и науки РФ в рамках Государственного задания (4.1346.2017/4.6), совета по грантам Президента РФ (СП-2749.2013.1), Российского фонда фундаментальных исследований (18-48-543040 р_мол_а, 16-38-00713 мол_а, 15-01-04320 А, 14-08-31559 мол_а, 14-08-31515 мол_а, 12-08-31221 мол_а), Российского Научного Фонда (14-19-01755, 18-19-00407, 15-19-30038).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность экспериментального исследования, указана цель, поставлены задачи, определена новизна решения, отмечена практическая ценность результатов.

В первой главе приведён аналитический обзор известных экспериментальных и теоретических результатов по течению изотермических и нагреваемых пленок жидкости.

Особое внимание уделено режимам развитого трехмерного волнового течения и переходному режиму от двумерных структур к трехмерному течению. В работе [Liu J., Schneider J. B., Golub J.P., 1995] показано, что двумерные волны могут распадаться на трехмерные синхронные волны и преобразовываться в солитоны. Наблюдалось также образование субгармонических трехмерных волн с чередованием гребней. Показано, что длина волны поперечных трехмерных возмущений убывает с ростом числа Рейнольдса. Крити-

ческая длина волны возмущения, при которой двумерные волны становятся неустойчивыми и распадаются в уединенные подковообразные волны определена в [Park C. D., Nosoko T., 2003]. Для числа Рейнольдса 20 эта длина составляет 3 см, а при увеличении числа Рейнольдса она начинает уменьшаться и при числах Рейнольдса больше 40 составляет 2 см. В последних работах ИТ СО РАН установлено, что переход от регулярных двумерных структур к трехмерному течению сопровождается существенным перераспределением жидкости в поперечном направлении [Kharlamov S. M. et al., 2015, Бобылев А.В. и др., 2017]

Приведен обзор ранее опубликованных результатов по теплообмену, гидродинамике и кризисным явлениям в нагреваемых пленках жидкости. В частности, представлены работы, в которых исследовалось формирование регулярных структур на поверхности нагреваемых пленок жидкости. Эффект образования регулярной структуры течения стекающей пленки жидкости при локальном нагреве обнаружен в 1994 г. в ИТ СО РАН группой проф. О.А. Кабова. Установлена термокапиллярная природа данного явления. По сути, открыто новое явление в физике жидкостей – формирование пространственной структуры в тонкой движущейся под действием гравитации пленке жидкости при ее локальном нагреве со стороны подложки.

Рассмотрено влияние термокапиллярных сил на распространение волн и на критический тепловой поток, соответствующий формированию первого устойчивого сухого пятна. Показано, что вязкость жидкости оказывает существенное влияние на пороговое значение удельного потока тепла, соответствующего разрыву пленки. Для того, чтобы учесть влияние свойств жидкости, традиционный критерий разрыва был модифицирован путем умножения на отношение L/l_δ , где L - длина нагревателя, а $l_\delta = (\sigma\mu^2/(\rho^3g^2))^{1/5}$ - характерный масштаб критической толщины пленки в изотермических условиях [Зайцев, Семенов, Кабов, 2016].

Во второй главе даётся детальное описание экспериментального стенда и методик измерения.

Стенд представлял собой замкнутый циркуляционный контур (рис. 1), включающий резервуар с насосом, рабочий участок, фильтр, ротаметры, трубопроводы и запорную арматуру. Рабочий участок состоял из несущей плиты 2, на которую устанавливался пленкоформирователь 1 и нагреватель 5. Рабочая жидкость с помощью насоса подавалась в пленкоформирователь, который включал накопительную камеру, распределительное устройство и сопло с калиброванной плоской щелью. Жидкость стекала по пластине и по соединительным каналам, под действием гравитации возвращалась в резервуар с электронасосом. Плита изготавливалась из текстолита и имела размеры 650x440x60 мм. Пленкоформирователь располагался в верхней части несущей плиты и расстояние от сопла до нагревателя X_n изменялось от 65 до 543 мм. Стабилизатор температуры 4 представляющий собой плоский металлический теплообменник с системой каналов, по которым прокачивалась рабочая жид-

кость, располагался в верхней части несущей пластины. Внешняя поверхность термостабилизатора тщательно шлифовалась, что обеспечивало постоянство щели сопла. Вертикальный рабочий участок был открыт в атмосферу. Ширина потока жидкости определялась шириной щели сопла $\Delta p=225$ мм. Высота щели сопла варьировалась в пределах 200-300 мкм.

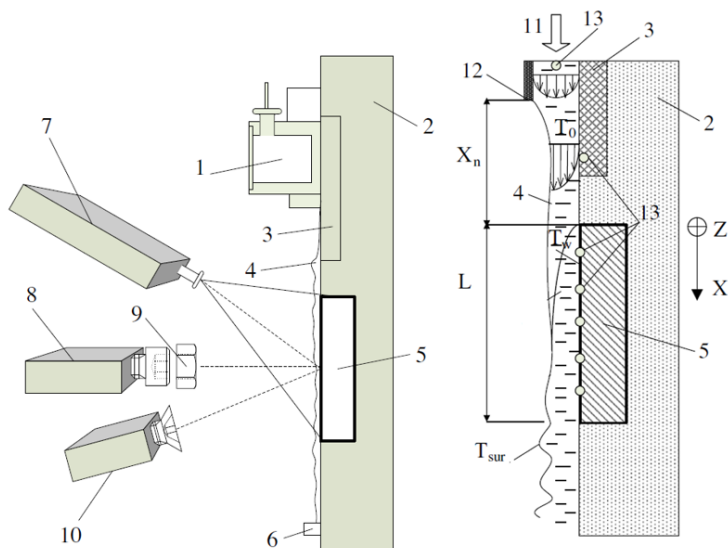


Рисунок 1 - Схема экспериментальной установки.

Для создания возмущений использовалась механическая система расположенных по горизонтальной линии цилиндров разного диаметра, которая опускалась в пленку жидкости поперек потока выше верхнего края нагревателя на 10–17 мм. Изменение интенсивности возмущений достигалось использованием цилиндров разного диаметра: $d_w = 1.5$ и 2 мм. Расстояние l_w между цилиндрами изменялось от 5 до 18 мм.

В экспериментах использовались следующие жидкости: дистиллированная вода, этиленгликоль и 60% раствор глицерина в воде. Начальная температура жидкости при выходе из сопла пленкоформователя составляла варьировалась от 15 до 70 °С. Число Рейнольдса пленки изменялось от 0.1 до 50. В экспериментах проводились визуальные наблюдения с регистрацией изображения на цифровые видео и фото камеры. Мгновенное поле толщин пленки жидкости измерялось флуоресцентным методом, мгновенное поле температуры измерялось инфракрасным сканером Titanium HD 570M.

В работе использовалось два нагревательных элемента с различными условиями на поверхности нагрева для формирования различных градиентов температуры на поверхности пленки.

На первом нагревательном элементе реализовывалось граничное условие близкое к $T_w = \text{const}$. Нагреватель представляли собой плоский теплообменники из меди шириной 150 мм и длиной 100 мм с прямоугольными каналами внутри для прокачивания нагретой жидкости. В качестве теплоносителя использовалась вода. Средняя плотность теплового потока на нагревателе определялась по количеству тепла, переданного от подогревающей воды.

На втором нагревательном элементе реализовывалось граничное условие близкое к $q = \text{const}$. Основой конструкции нагревательного элемента служит плита из стали толщиной 6 мм размером 150x150. Все остальные элементы конструкции нагревательного элемента располагаются в виде «слоеной структуры» и стянуты между собой. Тепловыделяющим элемент изготавливался из нержавеющей стальной фольги толщиной 100 мкм в виде параллельных соединенных между собой полос. Полость шириной 2 мм вокруг нагревателя заполнялась эпоксидной смолой. Локальная плотность теплового потока измеряется в пяти точках по длине пластины.

Для исследования взаимодействия трехмерных волн с термокапиллярными структурами двух типов и анализа влияния термокапиллярных и инерционных сил на характеристики течения была проведена серия экспериментов по синхронному измерению полей температуры и толщины. Синхронизация измерения полей толщины и температуры производилась с помощью светового сигнала. Учитывая инертность лампочки, время экспозиции кадров и прочие ошибки, погрешность наложения данных составила не более 10 мс, что незначительно при исследуемых параметрах. Для наложения данных были предварительно сделаны калибровочные снимки поверхности с мерной линейкой. Области, с искусственными неоднородностями (вызванными сухими частями нагревателя) были обрезаны и получена область 60x100 мм. ИК сканер был установлен на расстоянии 50 см от поверхности нагревателя, под углом 5° к нормали поверхности. Небольшая величина угла дала возможность использовать полученные данные без дополнительной обработки. Данная компоновка системы обеспечивала пространственное разрешение по толщине – 0,11 мм/пикс, пространственное разрешение по температуре – 0,3 мм/пикс и частоту съемки – 100 Гц.

В третьей главе рассматривается формирование термокапиллярных структур в условиях различных градиентов температуры.

На нагревателях с различными условиями на поверхности нагрева проведены эксперименты в условиях безволновой пленки жидкости (рис.2 и 3). Видно, что при натекании на нагреватель с граничным условием $T = \text{const}$ (рис. 2, $X=0$ мм), течение разделилось на вертикальные струи. расстояние между которыми составляло 8.5 мм. При этом продольные градиенты температуры в

области между струями достигали значений порядка 20 К/мм, а градиенты температуры вдоль струи 5 К/мм.

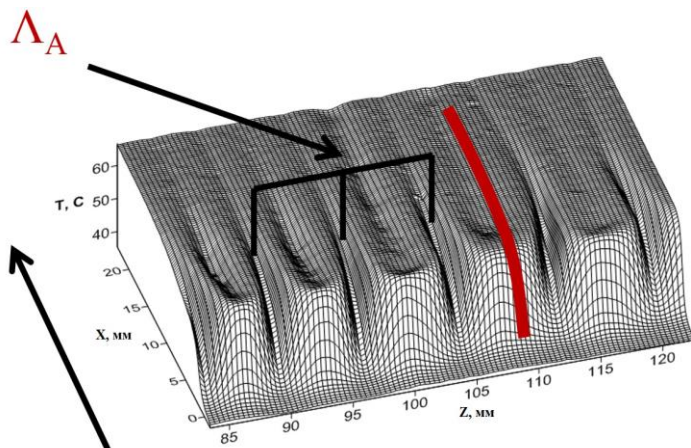


Рисунок 2 – Температура поверхности пленки 60% раствора глицерина в воде, $q = 0.1 \text{ Вт/см}^2$, $Re = 0.1$, нагреватель $T = \text{const}$.

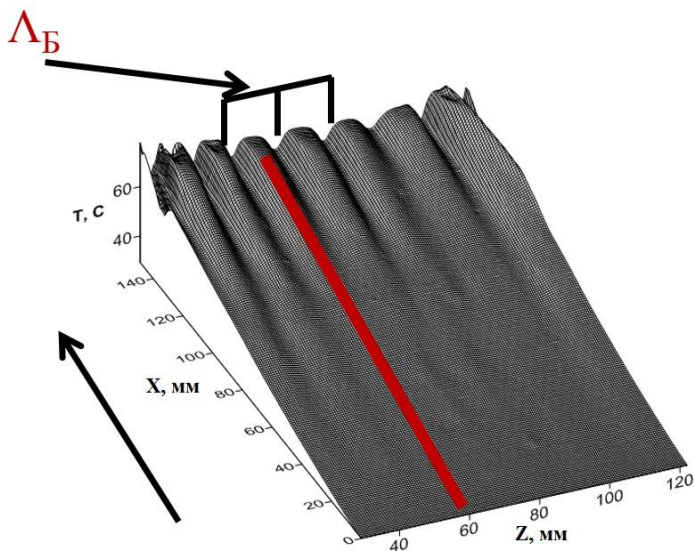


Рисунок 3 – Распределение температуры на поверхности пленки 60% раствора глицерина в воде, $Re=2$, $q=1.6 \text{ Вт/см}^2$, нагреватель $q = \text{const}$.

На нагревателе с граничным условием $q=\text{const}$ (рис. 3) при прохождении пленкой верхней кромки нагревателя на поверхности не возникает высоких градиентов температуры. Термокапиллярные структуры типа А не образовывались. Струи возникают на поверхности пленки постепенно с увеличением длины пробега по нагревателю. Начало формирования струй находится, примерно, на расстоянии 20 мм от верхнего края нагревателя. При этом продольные и поперечные градиенты температуры на поверхности не превышают 0.5 К/мм, разность температуры в струе и межструйной области при $X=130$ мм имеет величину порядка 4 °С, а расстояние между струями составляет 14 мм. В данных экспериментах структуры были зафиксированы при значениях чисел Рейнольдса от 0.1 до 10.

По результатам измерений течения безволновой пленки жидкости в условиях плавного изменения температуры построены графики зависимостей расстояния между струями от плотности теплового потока (рис. 4) и длины пробега пленки по нагревателю (рис. 5) для течения пленки 60% раствора глицерина в воде, $Re=2$. Для рис. 4 измерения производились вдоль линии на расстоянии 130 мм от начала нагревателя. Для каждого теплового потока значения усреднялись.

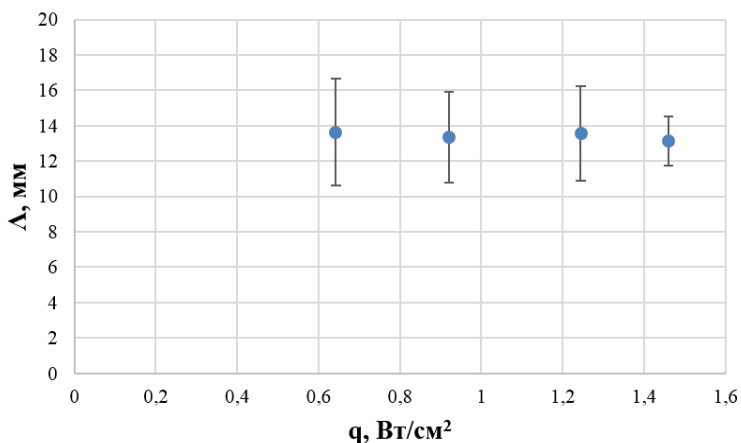


Рисунок 4 – Зависимость расстояния между струями от плотности теплового потока для течения пленки 60% раствора глицерина в воде, $Re=2$.

Видно, что среднее расстояние между струями постоянно и имеет величину порядка 13.5 мм и не зависит ни от теплового потока, ни от длины пробега пленки по нагревателю. Для анализа данных были использованы разные безразмерные критерии и параметры. Обобщение всех известных данных по расстоянию между струями при формировании термокапиллярных структур типа Б приведено на рис. 6. Расстояния измерялись для жидкостей с раз-

личными плотностями, коэффициентами поверхностного натяжения и в широком диапазоне изменения вязкости и расхода жидкости. Расстояние между струями обезразмеривалось делением на капиллярную постоянную жидкости ($l_\sigma = \sqrt{\sigma/\rho g}$).

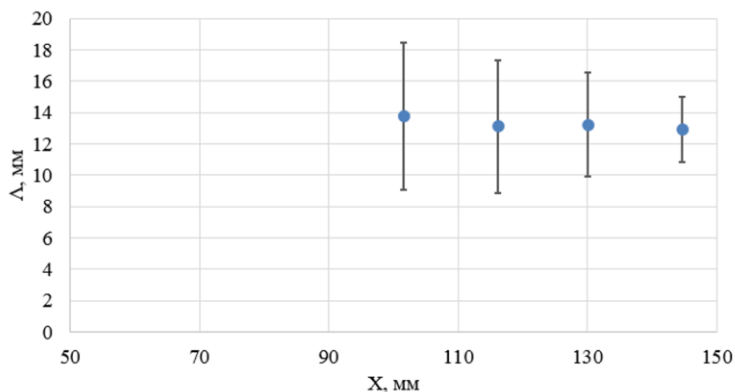


Рисунок 5 – Зависимость расстояния между струями от длины пробега пленки по нагревателю для течения пленки 60% раствора глицерина в воде, $Re=2$.

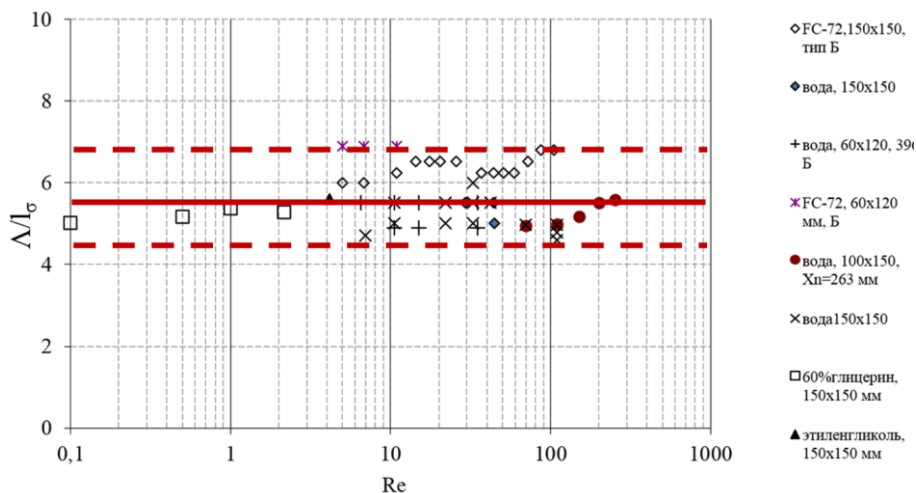


Рисунок 6 – Обобщение известных данных по безразмерному расстоянию между струями для структур типа Б.

Как видно все данные по безразмерному расстоянию между струями с 25% погрешностью имеют значение 5.5, которое не зависит ни от вязкости

жидкости ни от числа Рейнольдса. Применение других параметров приводило к худшим результатам. Например, использование параметра $l_\delta = (\sigma \mu^2 / (\rho^3 g^2))^{1/5}$, который применялся в [Зайцев, Семенов, Кабов, 2016], приводило к увеличению разброса данных на порядок.

Проведено исследование влияния внешних искусственных возмущений в виде ряда цилиндров на структуру течения. Воздействие возмущений с «наиболее опасной» длиной волны в сравнении с другой длиной волны показано на рис. 7. График обобщает все имеющиеся данные по воздействию возмущений на расстояние между струями для различных жидкостей и чисел Рейнольдса в условиях малых градиентов температуры на поверхности нагрева ($q = \text{const}$).

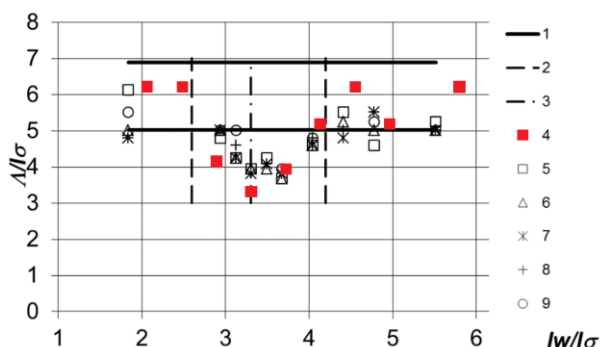


Рисунок 7 – Влияние длины волны возмущающей системы на формирование регулярных структур для различных жидкостей и чисел Рейнольдса

1 — без возмущений, 2 — граница влияния искусственных возмущений, 3 — наиболее опасная длина волны, 4 — $Re = 0.1$, глицерин; данные из [Чиннов, Жуковская, 2006], вода: 5 — $Re = 7.7$, 6 — $Re = 14.4$, 7 — $Re = 20.7$, 8 — $Re = 28.2$, 9 — $Re = 38.2$.

Формирование термокапиллярных структур при внесении возмущений с длиной волны, отличной от «наиболее опасной», происходит так же, как в невозмущенном случае. Струи образуются в нижней части нагревателя, при этом в верхней части пленка остается невозмущенной. Единственное отличие состоит в том, что вносимые возмущения моделируют температурные неоднородности на верхней кромке нагревателя, однако они сразу затухают. Возмущения с «наиболее опасной» длиной волны формируют температурные неоднородности практически по всей длине нагревателя.

Проведено исследование влияния внешних возмущений с «наиболее опасной» длиной волны на динамику границы сухого пятна при значениях плотности теплового потока выше порогового значения для образования первого устойчивого сухого пятна.

На рис. 8 показано распределение температуры на поверхности пленки жидкости в окрестности невозмущенного сухого пятна (граница пятна отмечена темной линией). Через 1.14 с после начала возмущения происходила перестройка течения на большей части нагревателя, и перемещенная струя доходила до верхней границы сухого пятна. В последующие 20 мс область перегретой жидкости сужалась, а температура в зоне контакта струи и сухого пятна оставалась на уровне 72 °С. Далее происходило перемещение границы пятна с одновременным уменьшением температуры перегретой жидкости. Скорость перемещения границы составляла 72 мм/с. Через 30 мс температура жидкости на границе достигала минимального значения 62 °С, а область перегретой жидкости исчезала. Видно, что область контакта струи жидкости с сухим пятном расположена не по центру пятна. В результате через 0.25 с после начала движения границы струя начинала обходить ее и как следствие снова возникала область перегретой жидкости. Возмущение достигало нижнего края нагревателя за время 1.4 с. Температура жидкости в окрестности осушенной зоны возрастала. Далее струя возвращалась к прямолинейному вертикальному движению, перемещая сухое пятно вправо.

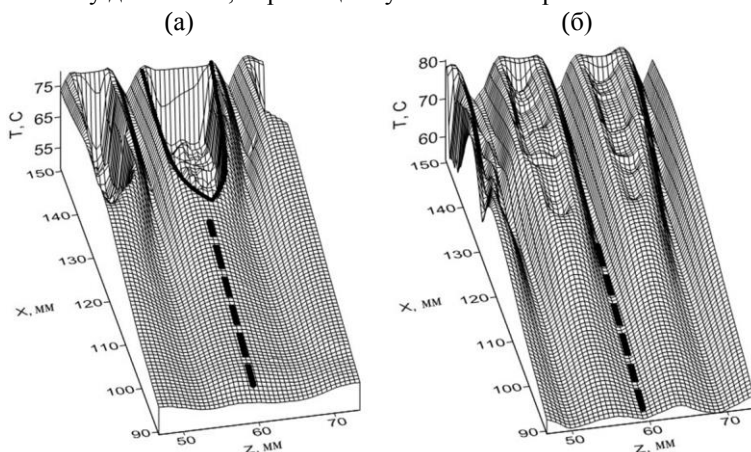


Рисунок 8 – Распределение температуры поверхности пленки в нижней части нагревателя при возмущении пленки 60% раствора глицерина в невозмущенном состоянии, $Re = 2.2$, $q = 1.8 \text{ Вт/см}^2$

(а) через 1.14 с после внесения возмущающих цилиндров в пленку жидкости; натекание струи на сухое пятно; (б) температура пленки после удаления сухого пятна через 5.5 с после начала возмущения.

Сухое пятно не орошалось полностью за полный период до начала нового возмущения, который составлял две секунды. Через 0.8 с после ввода системы цилиндров в жидкость она отводилась от стекающей пленки. Начинаясь обратный процесс формирования течения струй в невозмущенном ре-

жиме. Расстояние между струями возрастало, что так же приводило к деформации сухих пятен. Пятно полностью исчезало на третьем периоде возмущений на фазе затухания искусственных возмущений.

В четвёртой главе выполнено исследование влияния термокапиллярных сил на трехмерные волны.

В *разделе 4.1* выполнено исследование влияния термокапиллярных сил на трехмерные волны в условиях реализации низких температурных градиентов на поверхности пленки жидкости. Для этих целей использовался нагреватель размером 150x150 мм, на котором выполнялось граничное условие близкое к $q = \text{const}$.

Можно выделить два типа волн, которые поступают на нагреватель: волны средних размеров и крупные солитоны. По данным измерения флуоресцентным методом средняя ширина волн среднего размера составляла 14 мм, а амплитуда (максимальная толщина) - 0.18 мм. Перепад температуры между гребнем волны и межструйной областью составлял 1.5-3 К. Перепад температуры между гребнем крупной волны и межструйной областью составлял 3-5 К. Ширина фронта крупного солитона составляла 25-35 мм, а амплитуда 0.22-0.27 мм.

Для изучения механизма трансформации отдельных волн рассмотрим движение крупной волны, ширина которой в несколько раз превосходит расстояние между термокапиллярными струями (поперечные неоднородностями толщины и температуры), которые уже сформировались в остаточном слое пленки перед натекающей крупной волной.

Движение волны по нагревателю можно разбить на характерные интервалы. Отсчет времени происходил от момента пересечения гребнем волны верхней кромки нагревателя ($t_0=0$ с). Следующий момент времени (t_1) наступал, когда ширина волны в области нагревателя достигала максимальной величины, то есть волна полностью находилась на нагревателе. Затем следовал момент первого деформирования фронта (t_2), который определялся, когда на фронте возникали силы, не перпендикулярные линии фронта. Следующий момент (t_3) соответствовал распаду фронта волны. Затем осуществлялось поперечное перемещение частей волны в области с минимальным значением температуры в остаточном слое пленки перед волной. Момент (t_4) соответствовал достижению центра гребня волны линии с минимальным значением температуры. Дальнейшее движение происходило по строго вертикальным линиям - струям.

На рис. 9 представлена карта поверхностных термокапиллярных напряжений (показаны стрелками) при натекании крупной волны (ширина фронта ~ 35 мм) на нагреватель в момент времени $t = 20$ мс (течение снизу вверх, $Re = 10,5$, $q = 0,98$ Вт/см²), которые пропорциональны градиентам температуры ($\tau_{sur} = -grad\sigma = -d\sigma/dT * gradT$, где σ - коэффициент поверхностного натяжения) на поверхности пленки, и температура поверхности пленки. Фронт выделен сплошной белой линией. Определение фронта прохо-

дило по максимальному градиенту температуры на поверхности. Напряжения направлены перпендикулярно линии фронта волны и не вызывают его деформацию. Перед фронтом видны температурные неоднородности (пунктирные линии соответствуют минимумам температуры). Расстояние между минимумами температуры составляет 14 мм и совпадает с расстоянием между струями, формирующимися в режиме Б при малых числах Рейнольдса ($Re < 5$) и при более высоких числах Рейнольдса ($Re = 15-45$) [Чиннов, и др., 2007, Chinnov, Kabov, 2007]. На фронте крупной волны возмущения не наблюдаются. Градиенты температуры в остаточном слое перед волной составляют 0,05-0,1 К/мм. Градиенты температуры на фронте волны направлены перпендикулярно линии фронта и имеют величину 0,8 К/мм. Фронт волны практически не деформирован, а скорость его распространения составляет 260 мм/с. Рассмотрим движение нескольких точек на фронте с течением времени. Выделены три точки: передняя точка гребня фронта волны А, точка возникающего изгиба В, формирующаяся передняя точка второго гребня волны С.

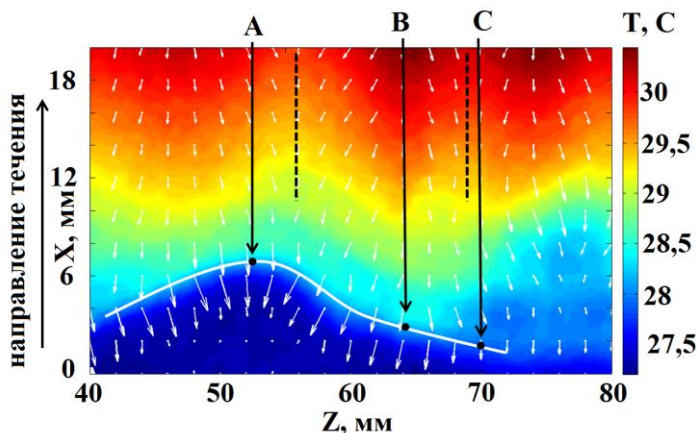


Рисунок 9 – Карта поверхностных термокапиллярных напряжений (показаны стрелками) при натекании крупной волны на нагреватель в момент времени $t=20$ мс.

В следующий момент времени при $t=60$ мс геометрия фронта начала изменяться: стал появляться прогиб фронта волны в области точки В. При этом распределение касательных термокапиллярных напряжений выглядит следующим образом: максимальное значение достигается в точке А ($\tau=0,33$ Па), минимальное значение в точке В ($\tau=0,17$ Па) и немного выше в точке С ($\tau=0,2$ Па). Скорости всех точек практически одинаковы 260 мм/с. В области прогиба фронта волны касательные напряжения имеют минимальные

значения и не позволяют объяснить механизм формирования перегиба волны влиянием только тормозящих термокапиллярных сил.

На рис. 10 представлено распределение модуля продольной и поперечной составляющей поверхностных термокапиллярных напряжений на фронте волны. Погрешность определения силы складывается из погрешности измерения температуры и расстояния и не превышает 0,2 Па для τ_x и 0,5 Па для τ_z . Слева и справа от точки А ($Z = 52$ мм) поперечная составляющая силы распределена неравномерно, что инициирует движение гребня по направлению к центру струи, формирующейся в остаточном слое ($Z = 56$ мм). Аналогичный эффект наблюдается в точке С, но поперечная составляющая силы намного меньше. Амплитуда волны в точке С так же меньше, поэтому величина этого воздействия достаточна для перемещения гребня волны влево к линии ($Z = 69$ мм).

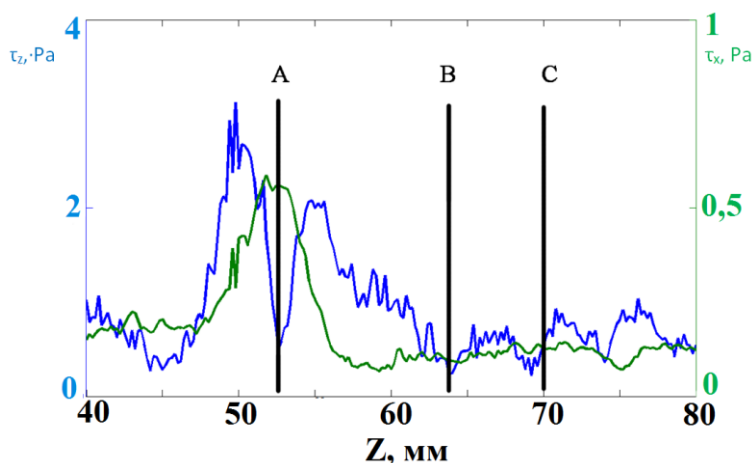


Рисунок 10 – Распределение продольной и поперечной составляющей поверхностных термокапиллярных напряжений вдоль фронта волны ($t=140$ мс).

Дальнейшее движение вызывает разрушение целостности фронта и выделение отдельных струй. При $t = 270$ мс происходит полное совмещение гребня волны со струями в остаточном слое, рис. 11. Видно, что при $X > 100$ мм волны двигаются вдоль вертикальных линий. Поперечные касательные напряжения, действующие на гребень волн с разных сторон примерно одинаковы. Соответственно поперечное перемещение струй прекращается. Таким образом, показано, что сочетание термокапиллярных и инерционных эффектов в волновой пленке жидкости приводит к деформации крупных естественно образующихся волн и их распаду на волны меньшей ширины, которые перемещаются в сторону струй, образованных термокапиллярной структурой

в остаточном слое. Данный сценарий является наиболее распространенной схемой разрушения крупных волн.

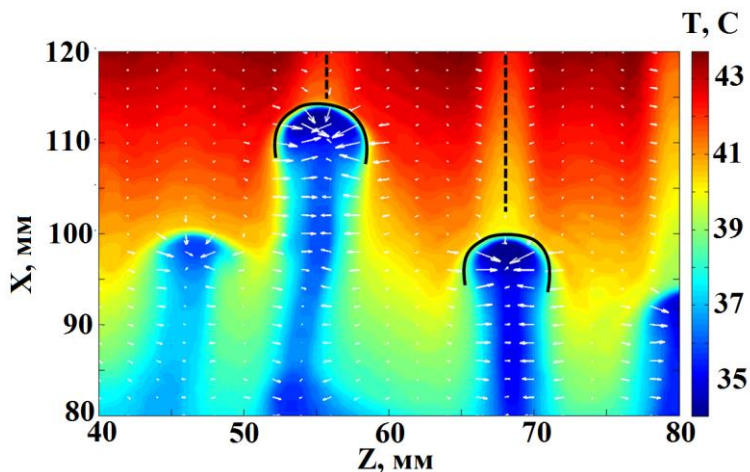


Рисунок 11 – Карта поверхностных термокапиллярных напряжений (показаны стрелками) при натекании крупной волны на нагреватель в момент времени $t=270$ мс.

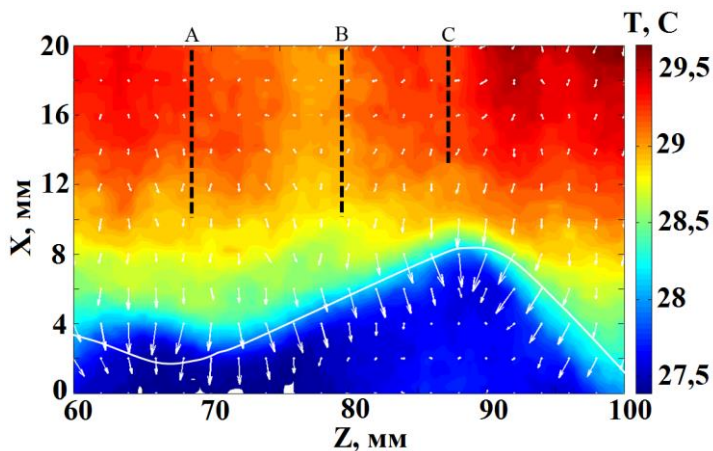


Рисунок 12 – Карта поверхностных термокапиллярных напряжений (показаны стрелками) при натекании крупной волны на нагреватель в момент времени $t=30$ мс.

Существуют более редкие сценарии, когда происходит замедление гребня волны с большим перераспределением жидкости в поперечном

направлении. На рис. 12 показано движение волны, когда ее гребень совпадает с максимумом температурных неоднородностей в остаточном слое перед фронтом. В этом случае гребень волны попадает между формирующимися струями. Реализуется другой сценарий трансформации крупного солитона. В данном случае движение волны сопровождается торможением ее гребня и интенсивным переносом массы жидкости в поперечном направлении. В итоге на месте гребня волны образуется межструйная область с малой толщиной пленки жидкости, где волны отсутствуют.

В остаточном слое перед фронтом наблюдаются неоднородности температуры, минимумы которых имеют поперечные координаты $Z_1=68$ мм (А) и $Z_2=80$ мм (В) соответственно. Гребень волны имеет поперечную координату $Z_3=87.5$ мм (С). Дальнейшее движение фронта отслеживаем вдоль линий с данными координатами.

Зная температуру вдоль выбранных линий в каждый момент времени, можно построить градиент температуры. Максимальный градиент температуры достигается на фронте волны. Таким образом, зная координату максимума градиента температуры, мы однозначно определяем координату фронта волны. Зная величину максимального градиента температуры и координату в каждый момент времени движения фронта можно построить их зависимость для трех линий от X , рис. 13.

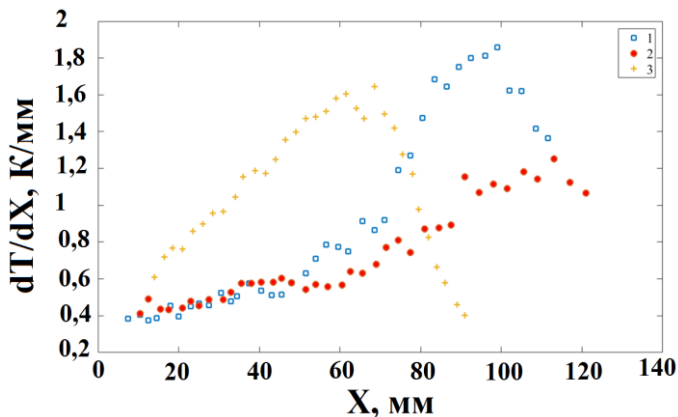


Рисунок 13 – Зависимость градиента температуры на фронте волны от длины пробега по нагревателю: 1 - $Z=68$ мм, 2 - $Z=80$ мм, 3 - $Z=87.5$ мм.

Видно, что градиент температуры на фронте волны в верхней части нагревателя практически совпадает для всех трех линий и имеет значение порядка 0.4 К/мм. В верхней части нагревателя при $X < 70$ мм наиболее высокие касательные напряжения (градиенты температуры) наблюдаются вдоль

гребня волны (линия С). Это приводит к тому что скорость его движения остается практически постоянной, рис. 14.

Наименьшие касательные напряжения зарегистрированы вдоль линии В, что приводит к формированию нового гребня волны, скорость движения которого возрастает. Аналогичный процесс проходит вдоль линии А. До момента времени $t=240$ с, касательные напряжения и скорости фронта волны по линиям А и В примерно одинаковы. При $X > 70$ мм ситуация меняется. При $t=290$ с. гребень волны, двигающийся вдоль линии В начинает опережать гребень волны, двигающийся вдоль линии С. Меняется характер зависимости градиента температуры вдоль линий В и С.

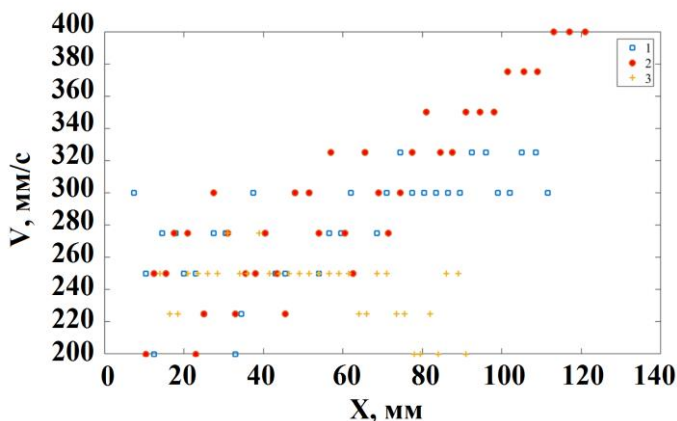


Рисунок 14 – Зависимость скорости фронта волны от длины пробега по нагревателю: 1 - $Z = 68$ мм, 2 - $Z = 80$ мм, 3 - $Z = 87.5$ мм.

Наименьший рост касательных напряжений наблюдаются вдоль линии В. Осуществляется перемещение жидкости из области старого гребня (линия С) в область нового (линия В), происходит значительный рост скорости нового гребня волны. Вдоль линии А касательные напряжения растут наиболее сильно, а значение скорости становится постоянной. Вдоль линии С касательные напряжения начинают уменьшаться. К этому моменту масса жидкости в области старого гребня волны существенно уменьшилась и продолжает уменьшаться. Скорость гребня уменьшается до значения 200 мм/сек, а потом незначительно возрастает. Поперечные расстояния между струями не одинаковы. Остатки старого гребня волны (линия С) перемещаются вправо, где формируется новая струя. В итоге формируется струйное течение с примерно одинаковым расстоянием между струями, рис. 15.

При движении трехмерных волн малого размера, процесс формирования струй происходит быстрее. Этому способствует малый размер и форма волны.

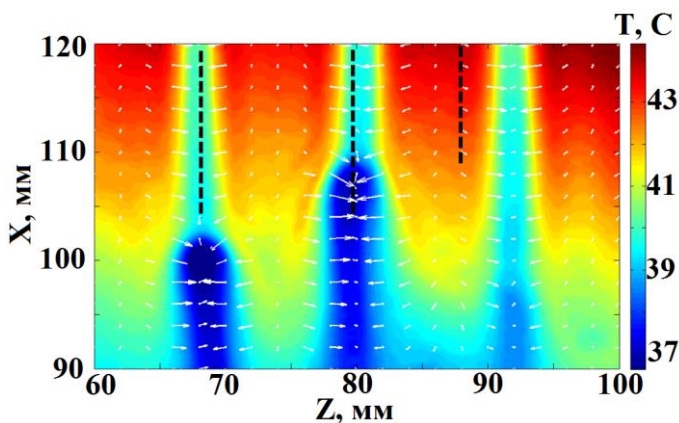


Рисунок 15 – Карта поверхностных термокапиллярных напряжений (показаны стрелками) при натекании крупной волны на нагреватель в момент времени $t=390$ мс.

Таким образом рассмотрены основные сценарии эволюции трехмерных волн в струи, что позволяет лучше понять механизм этого процесса.

В *разделе 4.2* выполнено исследование влияния термокапиллярных сил на волновое течение в условиях реализации высоких температурных градиентов на поверхности пленки жидкости. Для этих целей использовался нагреватель размером 150×100 мм, на котором выполнялось граничное условие близкое к $T=\text{const}$. Осуществлялось синхронное измерение полей толщины и температуры на поверхности пленки жидкости в области нагревателя.

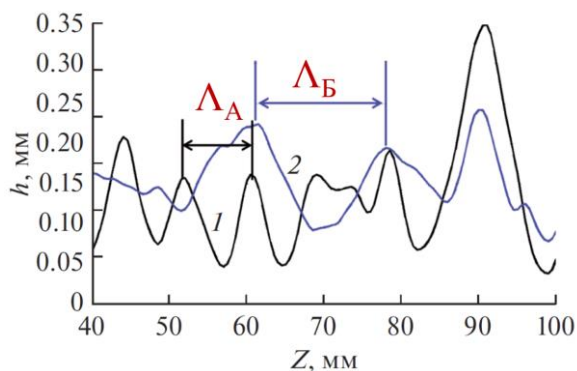


Рисунок 16 – Изменение расстояний между струями вдоль нагревателя в двух сечениях: 1 – $X = 10$ мм, 2 – $X = 90$ мм, $Re=10$, $q=2.55$ Вт/см².

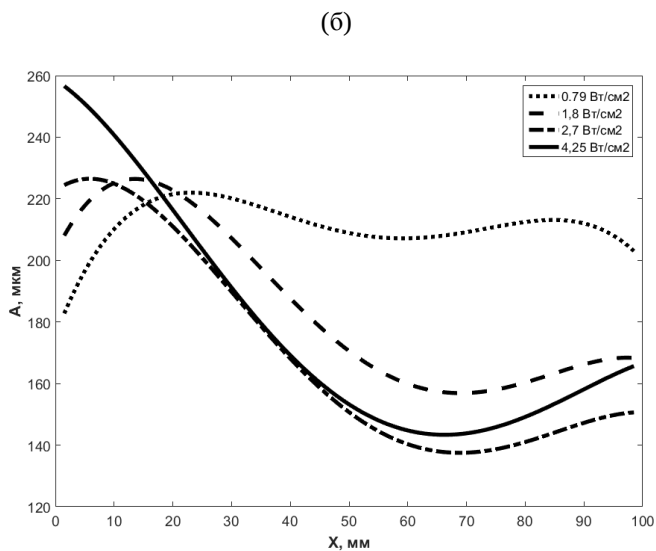
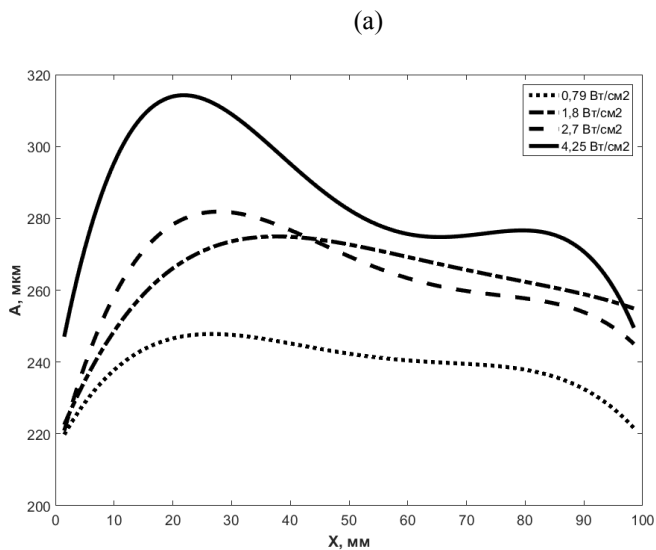


Рисунок 17 – Амплитуда волн в струе (а) и в межструйной области (б) от длины пробега пленки по нагревателю для различных значений теплового потока на нагревателе, $Re=33$.

Показано, что при достижении продольным градиентом температуры значений больших $7-10 \text{ К/мм}$ начинается формирование термокапиллярных

структур. В области передней кромки нагревателя ($X < 10\text{--}15$ мм) на поверхности остаточной пленки жидкости после прохождения фронта волны формируются термокапиллярные структуры в виде ряда струй с тонкой пленкой между ними. Расстояние между струями составляет $\Lambda_A = 10$ мм, что соответствует расстоянию между структурами в режиме А. Высота этих неоднородностей равна 0.12 мм.

При натекании нового фронта на такие структуры появляется периодическая неоднородность фронта волны по толщине в поперечном направлении. Такое возмущение фронта приводит к формированию трехмерных волн с поперечным расстоянием между гребнями $\Lambda_A = 10$ мм (рис. 16). Однако при $X > 23$ мм, где пленка жидкости прогрета почти до температуры нагревателя, а градиенты температуры на ее поверхности резко уменьшаются, данная длина волны становится неустойчивой и в нижней части нагревателя происходит слияние гребней трехмерных волн и формирование термокапиллярных структур в режиме Б со средним расстоянием между струями $\Lambda_B = 15$ мм (рис. 16).

На рис. 17 представлены данные по амплитуде волн струе и в межструйной области от длины пробега пленки по нагревателю для $Re=33$ (A – амплитуда волны, X – координата вдоль нагревателя, $X=0$ – начало нагревателя). Из графиков видно, что амплитуда волн в верхней части нагревателя выше, чем в нижней и возрастает с увеличением плотности теплового потока.

На рис. 18 представлены зависимости деформации поверхности пленки от безразмерной продольной координаты вдоль нагревателя для различных значений теплового потока. Для количественного описания поперечных деформаций в пленке жидкости использован критерий $Def=(h_{riv}-h_{val})/h_0$, определяемый как отношение разницы между средними толщинами пленки на гребне струи и в межструйной области к начальной толщине пленки. Как видно из графиков при формировании структур А (линии 1-4) характер зависимости меняется при высоких плотностях теплового потока. Это связано с тем, что при достижении пороговой плотности на верхней кромке нагревателя в остаточном слое жидкости между фронтами волн формируются термокапиллярные структуры в виде струй с тонкой пленкой между ними. Взаимодействие волн с данными структурами приводит к увеличению деформации в начале нагревателя увеличению амплитуд волн, их преобразованию в струи и появлению витания струй (отклонение от строго вертикального течения). Далее с увеличением длины пробега пленки по нагревателю деформации уменьшаются. При этом в нижней части нагревателя также формируется струйное течение с расстоянием между струями около 15 мм, как и при меньших Re . С другой стороны, при формировании структур Б (линии 5, 6) деформации поверхности растут постепенно как с увеличением теплового потока, так и с увеличением длины пробега по нагревателю.

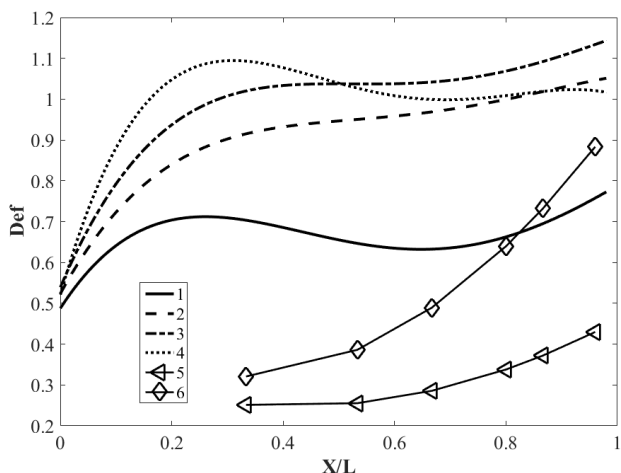


Рисунок 18 – Зависимость поперечных деформаций от безразмерной длины пробега пленки вдоль нагревателя.

При формировании структур типа А для нагревателя размером 150x100 мм при $Re=33$: 1 - $q=0.8$ Вт/см², 2 - $q=1.8$ Вт/см², 3 - $q=2.7$ Вт/см², 4 - $q=4.25$ Вт/см²; При формировании структур типа Б, для нагревателя размером 150x150 мм при $Re=33$, $X_n = 200$ мм: 5- $q=0.64$ Вт/см², 6- $q=1.21$ Вт/см² [Чиннов и др., 2007].

Установлено, что в результате взаимодействия волн со структурами в остаточном слое струя движется не строго по сплошной линии, а пересекая ее в нескольких точках. Когда фронт двумерной волны натекает на нагреватель, распределение толщины вдоль фронта практически равномерное. Далее при прохождении нагревателя на фронт начинают действовать термокапиллярные силы в направлении против течения. Это воздействие приводит к тому что на фронте начинают выделяться гребни, а толщина фронта между гребнями начинает уменьшаться. В процессе уменьшения толщины происходит перераспределение жидкости вдоль фронта. Жидкость из перемычек движется в сторону гребня, при этом движение настолько интенсивное, что гребень смещается от прямолинейного движения. Вследствие такого взаимодействия гребень волны формирует струю, которая постоянно смещается от среднего значения (возникает "витание").

В разделе 4.3 исследовано формирование термокапиллярных структур типа А при разрыве пленки жидкости. Выполнено исследование влияния начальной температуры жидкости на плотность теплового потока соответствующему разрыву жидкости (появлению первого устойчивого сухого пятна) $q_{сг}$ для чисел Рейнольдса 33 и 50. Начальная температура пленки воды изменялась в пределах от 15 до 70 °С. Обнаружено, что величина критиче-

ской плотности теплового потока, соответствующего разрыву пленки, существенно уменьшается с увеличением начальной температуры пленки жидкости, рис. 20.

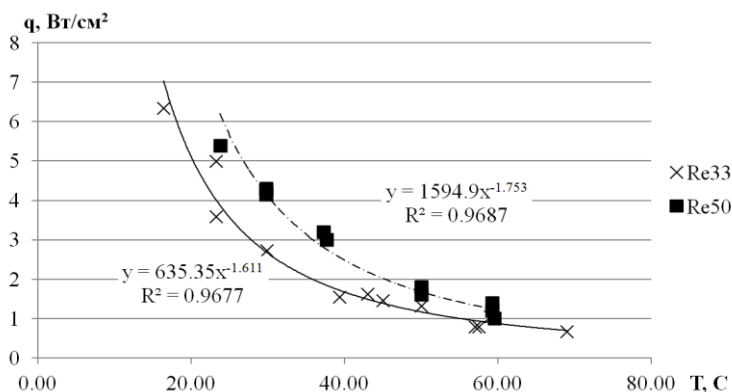


Рисунок 19 – Зависимость теплового потока, соответствующего формированию первого устойчивого сухого пятна, от начальной температуры пленки. 1 – $Re=33$, 2 – $Re=50$.

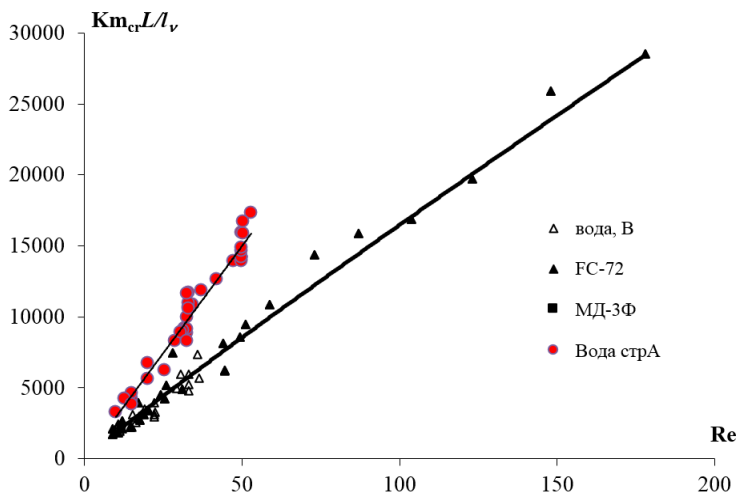


Рисунок 20 – Обобщение опытных данных по тепловому потоку, соответствующему формированию первого устойчивого сухого пятна.

На рис. 20 приведены данные по разрыву пленки жидкости при формировании структур «А» и «Б». При развитии на поверхности пленки жидкости

только структур Б разрыв происходил всегда в нижней части нагревателя, между сформировавшимися струями. С увеличением плотности теплового потока в нижней части нагревателя происходило резкое увеличение деформации пленки жидкости (рис. 18) что и приводило к ее разрыву.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые структуры типа Б (формирующиеся в условиях низких градиентов температуры на поверхности пленки жидкости) зафиксированы 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 типа А (которые образуются при высоких градиентах температуры на поверхности пленки жидкости) и не связаны с параметрами набегающих на нагреватель волн.

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 не зависит от безразмерных комплексов (чисел Марангони, Капицы и Рейнольдса пленки).

3. В результате экспериментального исследования воздействия периодических искусственных возмущений на нагреваемую пленку жидкости при малых числах Рейнольдса показано, что развитие инициированных термокапиллярных возмущений 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 способствуют повторному орошению сухих зон.

4. Показано, что под действием термокапиллярных сил происходит деформация трехмерных волн и переход к струйному течению. При движении крупных солитонообразных 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.

5. Впервые с использованием синхронного измерения полей температуры и толщины пленки проведено исследование взаимодействия трехмерных волн с термокапиллярными структурами двух типов, в результате которого установлено, что при достижении определенного значения градиента температуры на поверхности пленки жидкости в области передней кромки нагревателя характер течения изменяется. Показано что вследствие такого взаимодействия:

нарастает деформация поверхности пленки и амплитуда волн,
изменяется расстояние между струями вдоль нагревателя,

возникает зигзагообразное движение струй.

6. Обнаружено, что в результате взаимодействия гидродинамических волн с термокапиллярными структурами возрастает значение плотности теплового потока, соответствующее появлению первого устойчивого сухого пятна. Впервые выявлен и детально исследован новый механизм воздействия на пленочное течение, приводящий к повышению его устойчивости к разрыву. Данный результат является важным, так как обнаруженный способ повышения устойчивости пленок жидкости при определенных режимных параметрах ее течения может быть использован в промышленных установках.

Публикации по теме диссертации

В журналах из перечня ВАК:

1. Shatskii E. N. et al. The Effect of Liquid Viscosity on the Formation of Thermocapillary Structures //Technical Physics Letters. – 2017. – Т. 43. – №. 12. – С. 1080-1083.

2. Актершев С. П., Шатский Е. Н., Чиннов Е. А. 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 Журнал технической физики. – 2016. – Т. 42. – №. 19. – С. 46-54.

4. Шатский Е. Н., Чиннов Е. А. Синхронное измерение полей толщин и температур в стекающей нагреваемой пленке жидкости //Теплофизика высоких температур. – 2016. – Т. 54. – №. 6. – С. 965-968.

5. Чиннов Е. А., Шатский Е. Н. Термокапиллярные неустойчивости в стекающей пленке жидкости при малых числах Рейнольдса //Письма в Журнал технической физики. – 2014. – Т. 40. – №. 1. – С. 16-23.

6. Чиннов Е. А., Шатский Е. Н. Воздействие на контактную линию посредством искусственных возмущений в неизотермической пленке жидкости //Теплофизика высоких температур. – 2014. – Т. 52. – №. 3. – С. 477-480.

7. Чиннов Е. А., Шатский Е. Н., Кабов О. А. Эволюция температурного поля на фронте трехмерной волны в нагреваемой пленке жидкости //Теплофизика высоких температур. – 2012. – Т. 50. – №. 1. – С. 104-111.

8. Чиннов Е. А., Шатский Е. Н. Развитие искусственных возмущений в неизотермической пленке жидкости //Теплофизика высоких температур. – 2011. – Т. 49. – №. 6. – С. 918-923.

9. Чиннов Е. А., Шатский Е. Н. Управление взаимодействием гидродинамических волн с термокапиллярной неустойчивостью в стекающей пленке жидкости //Письма в Журнал технической физики. – 2010. – Т. 36. – №. 17. – С. 61-68.

10. Чиннов Е. А., Шатский Е. Н. Воздействие термокапиллярных возмущений на волновое движение нагреваемой пленки жидкости //Письма в Журнал технической физики. – 2010. – Т. 36. – №. 2. – С. 7-16.

11. Shatskiy E., Chinnov E. Thermocapillary rupture in falling liquid films at moderate Reynolds numbers //EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – Т. 159. – С. 00055.

12. Shatskiy E., Koemets Y., Chinnov E. The waves amplitudes increase due to interacting with thermocapillary structures //MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2016. – Т. 84. – С. 00036.

Материалы конференций:

13. Шатский Е.Н., Чиннов Е.А. «Эволюция трехмерных гидродинамических возмущений в термокапиллярных на поверхности пленки жидкости» // 7 конф. “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики”, Алушта, Украина, 21 - 25 сентября. - 2009. - С. 60-61.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. Шатский Е.Н. “Воздействие внешних возмущений на волновое движение нагреваемых пленок жидкости” // Тезисы докладов XI Всероссийской школы-конференции молодых ученых “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики”, Новосибирск, Россия, 17-19 ноября. – 2010. – С. 100.

18. Шатский Е. Н. «Влияние градиента температуры на волновое движение пленок жидкости» // Тезисы докладов 49 международной студенческой конференции “Студент и научно-технический прогресс”, Новосибирск, Россия, 16 – 20 апреля. - 2011. – С. 69.

19. Шатский Е.Н. «Деформация трехмерных волн при течении пленки по нагреваемой поверхности» // Тезисы докладов 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.

20. 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.

21. E. A. Chinnov, 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.

22. E. Shatskiy, E. Chinnov 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.

23. Шатский Е.Н. «Термокапиллярные неустойчивости в стекающих пленках жидкости» // Тезисы докладов Всероссийской конференции молодых ученых «Новые нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», Новосибирск, Россия, 3 – 4 октября. – 2013. – С. 53.

24. 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» // ISHM-II, Novosibirsk, Russia, 20-21 May. – 2015. – P. 27.

25. Шатский Е.Н., Коэмец Ю.А., Чиннов Е.А. «Разрыв стекающей пленки жидкости при взвимодействии волн с термокапиллярными структурами» // Тезисы докладов Всероссийской конференции «XXXII Сибирский теплофизический семинар», Новосибирск, Россия, 19–20 ноября. – 2015. – С. 147

26. Evgeniy Shatskiy, Yuliya Koemets, Evgeny Chinnov «The waves amplitudes increase due to interacting with thermocapillary structures» // International Symposium and School for Young Scientists Interfacial Phenomena and Heat Transfer, Novosibirsk, Russia, 2-4 of March. – 2016. – P. 80

Цитированная литература

Liu J., Schneider J. B., Gollub J. P. Three-dimensional instabilities of film flows // *Physics of Fluids*. – 1995. – Т. 7. – №. 1. – С. 55-67.

Park C. D., Nosoko T. Three-Dimensional Wave Dynamics on a Falling Film and Associated Mass Transfer // *AIChE Journal*. — 2003. — Т. 49, № 11. — С. 2715–2727

Kharlamov S. M. et al. The transition from two-dimensional to three-dimensional waves in falling liquid films: Wave patterns and transverse redistribution of local flow rates // *Physics of Fluids*. – 2015. – Т. 27. – №. 11. – С. 114106.

Бобылев А. В. и др. Динамика струй при изотермическом пленочном течении // *Письма в Журнал технической физики*. – 2017. – Т. 43. – №. 15. – С. 19-27.

Зайцев Д.В., Семенов А.А., Кабов О.А. Влияние вязкости на термокапиллярный разрыв стекающей пленки жидкости // *Теплофизика и аэромеханика*. — 2016. — Т. 23, № 4. — С. 649–652.

Kabov O. A., Chinnov E. A. Heat transfer from a local heat source to a sub-cooled falling liquid film evaporating in a vapor-gas medium // *Russ. J. Eng. Thermophys.* – 1997. – Т. 7. – №. 1-2. – С. 1-34.

Kabov O.A., Marchuk I.V., Chupin V.M. Thermal imaging study of the liquid film flowing on vertical surface with local heat source // Russian Journal of Engineering Thermophysics. — 1996. — Т. 6, № 2. — С. 104–138.

Чиннов Е.А. Деформация подковообразных волн при нагреве пленки жидкости // Письма в ЖТФ. — 2008. — Т. 34, № 14. — С. 40–47.

Influence of plate inclination on heat transfer and breakdown of locally heated flowing liquid film / E.A. Chinnov, O.A. Kabov, A.V. Muzykantov, D.V. Zaitsev // International Journal of Heat and Technology. — 2001. — Т. 19, № 1. — С. 31.

Чиннов Е.А., Жуковская О.В. Влияние искусственных возмущений на формирование структур в неизотермической пленке жидкости // Письма ЖТФ. — 2006. — Т. 32, № 9. — С. 87.

Волновые характеристики неизотермической пленки жидкости при формировании струй на ее поверхности / Е.А. Чиннов, А.Д. Назаров, А.В. Сапрыкина и др. // ТВТ. — 2007. — Т. 45, № 5. — С. 725–732.

Chinnov E.A., Kabov O.A. Marangoni Effect on Wave Structure in Liquid Films // Micro gravity science and technology. — 2007. — Т. 19, № 3/4. — С. 18–22.

Подписано к печати 2018г. Заказ №

Формат 60×84/16. Объем 1.0 уч.-изд.л. Тираж 100 экз.

Отпечатано в Институте теплофизики СО РАН
просп. Ак. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090