

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Шатского Евгения Николаевича “Влияние термокапиллярных эффектов на характеристики течения нагреваемой плёнки жидкости”, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность исследований. Развитие технологий, в которых используются тонкие жидкие плёнки, существенно расширило круг задач, изучение которых представляет как фундаментальный, так и практический интерес. К таким задачам можно отнести повышение эффективности и интенсификации процессов теплообмена в различных аппаратах и устройствах: абсорберах, ректификационных колоннах, испарителях, конденсаторах, кристаллизаторах, электролизёрах, парогенераторах. Плёночные течения жидкостей реализуются в тепловых трактах АЭС, системах термического контроля с капиллярной прокачкой теплоносителя, промышленных установках нефтегазовой промышленности. Жидкие плёнки применяют для защиты стенок камер сгорания и сверхзвуковых сопел жидкостных ракетных двигателей, а также в технологиях термического нанесения или осушения покрытий. Близкие к плёночным ривулетные течения реализуются в различных установках, используемых в энергетической, химической и пищевой промышленности, теплообменниках для сжижения природного газа.

Жидкие плёнки в физических системах обеспечивают высокую скорость тепло- и массообмена, именно этим обусловлено их столь широкое применение. Одной из проблем, возникающих при реализации плёночных технологий, является формирование областей локального перегрева с образованием сухих пятен. Это может приводить к критическому падению характеристик теплообмена и возможному разрушению рабочего узла или всей системы. Кроме того, тонкие слои жидкости чувствительны к совокупному действию тепловых, гравитационных и механических воздействий, вызывающих неустойчивости различной природы или разрыв плёнки. В основе многих технологических процессов, использующих жидкие плёнки, лежит использование эффекта Марангони. Поэтому исследование влияния термокапиллярного эффекта на структуру и характеристики плёночного течения в быстропеременных температурных полях, проведённое Е.Н. Шатским, является актуальной и практически важной задачей. А учитывая отсутствие корректных математических моделей, с исчерпывающей полнотой описывающих явления в тонких плёнках в условиях совместного действия разнородных эффектов и позволяющих точно прогнозировать динамику процессов тепломассообмена, подобные экспериментальные исследования являются необходимой эмпирической базой для проверки и подтверждения обобщённых подходов к описанию явлений, аналитических результатов и результатов численного моделирования.

Актуальность и востребованность работы подтверждается и тем, что она связана с исследованиями, проводимыми ИТ СО РАН в рамках Программ фундамен-

тальных научных исследований Академии наук и проектов, поддерживаемых на конкурсной основе.

Структура и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, в котором обосновывается актуальность тематики исследования и целесообразность проведения экспериментов, формулируются цели и задачи, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы, содержащего 101 наименование. Объём составляет 111 страниц.

В первой главе анализируются современное состояние изучаемых проблем и известные результаты исследований процессов теплообмена в тонких жидких плёнках, отмечены неполнота результатов или отсутствие отдельных данных для некоторых рассматриваемых задач.

Во второй главе приводится описание экспериментальной установки и используемых методик измерения и фиксации основных параметров.

Третья глава посвящена исследованию влияния управляющих воздействий (градиентов температуры, расхода жидкости и механических возмущений) на топологические и тепловые характеристики термокапиллярных структур разных типов. Показана возможность управления структурами и реализации условий, приводящих к повторному орошению сухих пятен.

В четвёртой главе представлены результаты исследования процессов волнообразования в термокапиллярных структурах и волновых характеристик для структур разных типов при различных значениях градиентов температуры. Изучено влияние взаимодействия трёхмерных волн и термокапиллярных структур на формирование устойчивого сухого пятна.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Научная новизна. К настоящему моменту хорошо известны фундаментальные результаты исследований волновых и термокапиллярных течений жидких плёнок, проведённые П. Л. Капицей, В. Я. Шкадовым, Е. А. Демехиным, В. Е. Накоряковым, С. В. Алексеенко, О. А. Кабовым, Н.-С. Chang, С. Ruyer-Quil, Р. Manneville, S. Kalliadasis, M. G. Velarde, B. Scheid и др. Тем не менее многие вопросы, связанные с процессами тепло- и массопереноса в плёнках, остаются открытыми. В настоящее время не вполне понятны механизмы управления самоорганизующимися пространственными структурами в тонких жидких слоях при совместном влиянии механических, структурных, тепловых и гравитационных факторов, отсутствуют строгие критерии, определяющие условия формирования сухих пятен, а также универсальные методики для предотвращения их появления в условиях быстропеременных температурных полей.

В диссертационной работе Е.Н. Шатского получены новые результаты, вносящие вклад в раздел теплофизики, связанный с методами экспериментального исследования процессов тепломассообмена в жидких плёнках. Научная новизна представленных результатов состоит в следующем:

1. Проведён анализ топологических и тепловых характеристик термокапиллярных структур, возникающих в свободно стекающей жидкой плёнке при интенсивном нагреве, и границ значений управляющих параметров, при которых эти структуры формируются. Впервые экспериментально установлена реализуемость структур типа Б при малых значениях числа Рейнольдса в условиях безволнового течения.

2. Экспериментально доказано, что формирование структур типа Б обеспечивается в широком диапазоне значений числа Рейнольдса при малых числах Марангони, которые достигаются за счёт малых градиентов температуры на поверхности плёнки.

3. Показана возможность перемещения струй и повторного орошения сухих пятен с помощью искусственных механических возмущений при достаточно высоких тепловых потоках.

4. Экспериментально подтверждено определяющее влияние термокапиллярного эффекта на деформацию трёхмерных волн на поверхности тонкого жидкого слоя, а также на образование, характер движения и размер ривулетов в плёнке.

5. Предложен новый метод воздействия на плёночное течение, обеспечивающий повышение его устойчивости к разрыву.

Обоснованность и достоверность результатов диссертационной работы обусловлена выбором экспериментальных методов, надёжность которых обеспечивалась проведением калибровочных и тестовых испытаний, хорошей воспроизводимостью результатов и сопоставлением полученных экспериментальных данных с результатами других авторов.

Научное и практическое значение работы заключается в выявлении закономерностей формирования термокапиллярных структур разных типов в жидкой плёнке при различной внешней тепловой нагрузке. Впервые получены результаты, характеризующие динамику взаимодействия трёхмерных волн с термокапиллярными структурами, которые позволили открыть новый способ повышения устойчивости плёнки к разрыву. Предложенный метод может быть реализован в промышленных установках. Результаты диссертации могут быть полезны при постановке новых физических экспериментов с целью подбора эффективных параметров для интенсификации тепломассопереноса.

Оценка диссертации. По содержанию диссертации можно сделать следующие **замечания**:

1. В тексте отсутствуют характерные для экспериментальных работ сравнение известных экспериментальных методик измерений и фиксации, обоснование выбора применяемых диссертантом методов, описание их преимуществ перед другими возможными методами, используемыми при проведении подобных теплофизических исследований.

2. Автор оперирует терминами «низкие», «высокие» градиенты температуры, «небольшое влияние», «малые» числа Рейнольдса. При этом не приводятся оценки соответствующих параметров и/или условия, при которых подобные выражения и сравнительные степени имеют чёткий смысл.

3. Вызывает недоумение использование большого количества не принадлежащих соискателю рисунков в тексте введения (пятая часть от общего числа рисунков в диссертации), особенно там, где в этом не было никакой необходимости. На мой взгляд, уместно было использовать лишь рис. 1.7 и 1.8, на которых приведены фотографии термокапиллярных структур типов А и Б, обсуждаемые в диссертации. Что касается остальных рисунков и графиков, вполне достаточно имеющегося словесного описания известных результатов других авторов и ссылок на соответствующие работы.

4. На стр. 41 соискатель использует выражение «волновые характеристики плёнки» без всякой конкретики. Приходится лишь догадываться, что имеются в виду геометрические, временные и пространственные параметры волн, а также характеристики интенсивности волнового процесса.

5. В п. 3.2 вызывает совершенную путаницу введение параметра Λ на рисунке 3.8. В предыдущем пункте 3.1 автор вводит обозначения Λ_A и Λ_B в качестве геометрических параметров структур соответствующего типа. Поскольку при соответствующих значениях числа Рейнольдса ($Re = 2$) реализуются структуры типа Б, то соответствуют ли зависимости $\Lambda(q)$ и $\Lambda(X)$ на рис. 3.8 ранее введённой величине Λ_B ?

6. Вызывает вопрос использование зависимости (3.1) для сопоставления данных на рис. 3.11, полученных соискателем и другими экспериментаторами. По утверждению диссертанта соотношение (3.1) для геометрической характеристики структур λ_{riv} противоречит экспериментальным данным экспериментов (см. стр. 56). Насколько в этом случае корректно её использовать?

7. При обобщении известных данных по безразмерному расстоянию между струями для структур типа Б на рис. 3.12 автор использует в качестве характерного масштаба длины капиллярную постоянную жидкости l_c . При этом формулируется следующий вывод: «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». Я склонна считать этот результат формальным. Во-первых, 25% погрешность не является статистически достоверной. Во-вторых, то, что при другом способе обезразмеривания автор получал ещё большие отклонения, свидетельствует лишь о том, что следовало искать другой способ сравнения. Например, можно использовать для определения характерного масштаба статистические методы или решать некоторую задачу оптимизации. В последнем случае следует искать такую характерную длину l , на которой реализуется минимум функционала, характеризующего отклонения известных параметров от среднего значения. В-третьих, все используемые автором масштабы длины зависели от свойств жидкости, а обобще-

ние проводилось для разных жидких сред. Разумнее в качестве характерного масштаба длины было выбрать величину, не зависящую от теплофизических параметров, например, начальную толщину плёнки.

8. В п. 3.3. при анализе возмущающей моды («наиболее опасной») автор не предлагает никакого анализа характеристик этой моды. Несмотря на то, что эксперименты проводились в условиях малых градиентов температуры, эта мода может быть тепловой или термокапиллярной. Исключить, или наоборот подтвердить, вязкие (или тепловые) моды можно было экспериментально, сравнив соответствующие результаты для жидкостей с существенно различными вязкими (или тепловыми) свойствами. Следует отметить, что и некоторые другие результаты приводятся лишь «описательно», без попытки проанализировать механизмы, обеспечивающие разные тепловые или гидродинамические картины наблюдаемых режимов течений.

9. В п. 4.1 диссертант отмечает, что существуют «более редкие сценарии» эволюции трёхмерных волн в струи. Разумно было бы привести условия, при которых эти «более редкие сценарии» наблюдались в экспериментах.

10. В тексте диссертации встречаются опечатки, пунктуационные и синтаксические ошибки, дублирование частей текста (стр. 27-28, 76-78).

Сделанные замечания не снижают высокой положительной оценки результатов диссертационной работы, их научной и практической значимости.

Заключение по диссертации. Диссертация и автореферат написаны ясным научным языком, хорошо иллюстрированы. В целом можно заключить, что диссертация Е. Н. Шатского «Влияние термокапиллярных эффектов на характеристики течения нагреваемой плёнки жидкости», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, соответствует паспорту специальности и может рассматриваться как завершённая научно-квалификационная работа, которая выполнена на высоком научном уровне и вносит вклад в развитие экспериментальных методов исследования процессов тепломассобмена в жидких плёнках. В работе приведены результаты экспериментальных исследований процессов тепло- и массообмена в плёночных течениях, широко применяемых в разнообразных технологических процессах, установлены закономерности формирования термокапиллярных структур разных типов в жидкой плёнке при различной внешней тепловой нагрузке. К несомненным достоинствам работы следует отнести получение нового способа повышения устойчивости плёнки к разрыву, имеющего высокую практическую значимость. Результаты работы представлены на всероссийских и международных конференциях и с достаточной полнотой опубликованы в 27 печатных работах, из них 12 – в ведущих журналах, входящих в перечень ВАК в действующей редакции и международную систему цитирования Web of Science. Автореферат диссертации полно и правильно отражает её содержание.

По актуальности, новизне, научной и прикладной значимости, диссертационная работа Евгения Николаевича Шатского «Влияние термокапиллярных эффектов на характеристики течения нагреваемой плёнки жидкости» удовлетворяет требованиям ВАК России, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, согласно Положению о присуждении учёных степеней в текущей редакции, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент:

ведущий научный сотрудник отдела дифференциальных уравнений механики Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН (ИВМ СО РАН), доктор физико-математических наук

Бекежанова Виктория Бахытовна

19.11.2018

660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44

Тел.: (391) 290-51-42, e-mail: vbek@icm.krasn.ru

Подпись Виктории Бахытовны Бекежановой удостоверяю:

Ученый секретарь ИВМ СО РАН, к.ф.-м.н.

Вяткин Александр Владимирович



Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН (ИВМ СО РАН), 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/44

Тел.: (391) 290-51-42, e-mail: sek@icm.krasn.ru