

На правах рукописи



БУСОВ Константин Анатольевич

**ДИНАМИКА ВСКИПАНИЯ В СТРУЯХ ПЕРЕГРЕТЫХ ЖИДКОСТЕЙ
ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ЧЕРЕЗ КОРОТКИЙ ЦЕЛЕВОЙ КАНАЛ**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2015

Работа выполнена в лаборатории фазовых переходов и неравновесных процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики Уральского отделения Российской академии наук

Научный руководитель – доктор физико-математических наук
Решетников Александр Васильевич

Официальные оппоненты: **Буланов Николай Владимирович**, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Уральский государственный университет путей сообщения», профессор кафедры физики и химии;

Болтачев Грэй Шамилевич, кандидат физико-математических наук, доцент, ФГБУН Институт электрофизики УрО РАН, старший научный сотрудник лаборатории нелинейной динамики

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»

Защита состоится "13" февраля 2015 г. в 15:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.02 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>

Автореферат разослан « 12 » января 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ищенко Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Истечение двухфазных сред исследуется в связи с процессами, происходящими в различных энергетических, криогенных и химических аппаратах. Актуальность таких исследований связана с решением проблем безопасности энергетического оборудования при аварийной разгерметизации контура теплоносителя. На последствия аварии с локальной разгерметизацией трубопровода (сосуда) высокого давления влияют различные факторы, например расход теплоносителя, форма струи и, ее динамическая реакция на элементы конструкции. Использование предельных и критических тепловых нагрузок в современном энергетическом оборудовании приводит к тому, что при разгерметизации сосуда высокого давления жидкие теплоносители оказываются в неравновесном или метастабильном состояниях с пониженной устойчивостью. В сильно перегретой метастабильной жидкости фазовое превращение может происходить по механизму взрывного вскипания [1], которое сопровождается выделением значительного количества энергии, что может приводить к гидравлическим ударам и нарушению технологических режимов. Актуальной задачей является установление закономерностей и характеристик интенсивного вскипания в перегретой жидкости при глубоких заходах в область метастабильных фазовых состояний в условиях мощного тепловыделения, приводящего к паровому взрыву.

Быстрый сброс давления в сосудах с горячей жидкостью используется как высокоэффективный способ для мелкодисперсного распыления различных веществ и топлив [2]. Взрывное вскипание нашло эффективное практическое применение в новой технике пожаротушения [3].

Экспериментальные исследования быстрой разгерметизации с парообразованием жидкости применительно к задачам описания разрыва элементов охлаждающих систем были инициированы академиком В.П. Скриповым. Проведенные в Институте теплофизики УрО РАН исследования взрывного вскипания перегретых жидкостей основаны на знании кинетики парообразования в условиях высоких перегревов. Были исследованы динамические характеристики струи вскипающей жидкости в условиях высоких перегревов и интенсивного зародышеобразования при истечении через короткие цилиндрические каналы [4,5]. Существенное влияние на динамические характеристики вскипающих потоков оказывают геометрические условия истечения, в частности, изменение формы выходного канала. В диссертационной работе были поставлены задачи экспериментального исследования динамики вскипания сильно перегретых жидкостей при истечении через щелевые каналы.

Цель работы: экспериментальное исследование динамики вскипания в плоских струях горячих воды, этанола и водных растворов этанола при разных степенях перегрева, в том числе предельных, и различных механизмах

парообразования; выявление условий кризисного поведения интегральных характеристик струй – реактивной отдачи и формы; нахождение и исследование низкочастотных пульсаций с $1/f$ – спектром в струе перегретой жидкости для обнаружения переходных режимов вскипания.

Научная новизна исследования:

1. Проведены систематические экспериментальные исследования динамических характеристик струй вскипающей воды, этанола и его водных растворов в условиях высоких и предельных перегревов при истечении через короткий щелевой канал в атмосферу.

2. Установлено влияние механизмов парообразования на эволюцию формы плоской струи вскипающей жидкости. Обнаружено кризисное поведение формы струи (полное раскрытие струи) и реактивной отдачи при истечении из сосуда высокого давления при начальных параметрах, соответствующих, как линии насыщения, так и линиям с постоянным начальным давлением (изобарам).

3. Определены геометрические условия за выходом из короткого щелевого канала, способствующие полному раскрытию струи и резкому падению ее реактивной силы.

4. Обнаружено присутствие во вскипающей струе низкочастотных пульсаций со спектром мощности, обратно пропорциональным частоте ($1/f$ – спектром) и установлена связь с переходными режимами кипения – перехода от вскипания на отдельных невзаимодействующих центрах кипения к интенсивному парообразованию на многочисленных гетерогенных центрах, при переходе от интенсивного гетерогенного парообразования к гомогенному флуктуационному вскипанию, – и с переходами к полному раскрытию струи.

Теоретическая и практическая значимость работы

Фундаментальная ценность работы связана с получением новых знаний о закономерностях вскипания и динамических характеристиках струй при разгерметизации сосудов высокого давления в условиях высоких и предельных перегревов жидкости.

Экспериментальные исследования быстрой разгерметизации сосудов высокого давления с горячей жидкостью и взрывообразным парообразованием связаны с проблемой безопасности объектов атомной энергетики, криогенной спецтехники и элементов энергетического оборудования. Результаты работы могут служить основой для выработки рекомендаций по оценке реактивных усилий струй двухфазных сред в энергонапряженных процессах. Результаты наших опытов нашли применение в модернизации пожарной техники нового поколения, использующей горячую воду в качестве противопожарного агента.

Обнаруженные крупномасштабные пульсации с $1/f$ – спектром указывают на необходимость проведения спектральной диагностики в аппаратах с предельными и критическими тепловыми нагрузками.

Результаты экспериментальных исследований динамики вскипания могут быть полезны и для других технических устройств, в частности, для распыления топлив.

Работа соответствует паспорту специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника для физико-математических наук (п. 1. Фундаментальные, теоретические и экспериментальные исследования молекулярных и макросвойств веществ в твердом, жидком и газообразном состоянии для более глубокого понимания явлений, протекающих при тепловых процессах и агрегатных изменениях в физических системах).

Защищаемые положения:

1. Кризисное поведение реактивной отдачи плоских вскипающих струй обусловлено интенсивным вскипанием в струе и наличием прилегающей плоскости в сечении выходного среза канала.

2. Форма плоских струй вскипающей жидкости детерминирована степенью перегрева и внешними геометрическими условиями за коротким каналом.

3. Резкое снижение величины реактивной отдачи струи связано с полным раскрытием струи.

4. Детектирование переходных режимов поведения потока вскипающей жидкости возможно посредством обнаружения низкочастотных пульсаций с $1/f$ – спектрами.

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в подготовке, проведении и обработке опытов по измерению реактивной отдачи вскипающих плоских струй и в получении спектров мощности пульсаций. Лично диссертантом выполнено изготовление внешних прилегающих плоскостей, использованных в исследованиях. Эксперименты проводились совместно с научным руководителем Решетниковым А.В. и научным консультантом Мажейко Н.А. На основании полученных экспериментальных результатов коллективом готовились научные публикации.

Апробация работы

Основные результаты работы были доложены на следующих российских и международных конференциях и семинарах: X–XIV всероссийская молодежная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (Екатеринбург, 2009–2013 гг.); Пятая Российская национальная конференция по теплообмену РНКТ-5 (Москва, 2010 г.); XVIII и XIX школа-семинар под руководством академика А.И. Леонтьева (Звенигород, 2011 г., Орехово-Зуево, 2013 г.); XIV Минский международный форум по тепло- и массообмену (Минск, 2012 г.); VIII Всероссийский семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике (Екатеринбург, 2013 г.).

Публикации

По теме работы опубликовано 5 статей в научных рецензируемых журналах, определенных ВАК, 10 тезисов докладов всероссийских и международных конференций.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 104 страницах, содержит 33 рисунка, 2 таблицы, список литературы из 118 наименований, в том числе 46 на иностранном языке.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность темы, поставлена цель, раскрыта новизна, фундаментальная и практическая значимость работы.

Первая глава «Аналитический обзор» посвящена вопросам физики метастабильного фазового состояния.

При истечении горячей жидкости через короткий канал осуществляется глубокий заход жидкости в область метастабильных фазовых состояний. В зависимости от начального состояния жидкости в потоке могут реализоваться различные степени перегрева. Для воды: малые ($\Delta T = T_{0s} - T_s(p_a) = 50K$), умеренные ($50K < \Delta T < 90K$), высокие $90K < \Delta T < 210K$ и предельные $\Delta T > 210K$.

По мере удаления от линии насыщения в область метастабильных состояний сильно уменьшается работа образования критического зародыша W_k . Это приводит к возникновению зародышей за счет тепловых флуктуаций (гомогенная нуклеация). В этом случае скорость флуктуационного зародышеобразования J в рамках теории гомогенной нуклеации рассчитывается по формуле

$$J = NB \exp\left(-\frac{W_k}{kT}\right),$$

где N – количество молекул в единице объема, B – кинетический множитель, k – постоянная Больцмана, T – температура. Частота зародышеобразования J чрезвычайно сильно зависит от параметров состояния – давления p и температуры T .

Вскипание при интенсивном флуктуационном рождении пузырьков пара называют взрывным вскипанием. Условие взрывного вскипания для перегретой жидкости, истекающей через короткий канал, было получено Павловым П.А. [6].

Экспериментальные исследования по кинетике зародышеобразования свидетельствуют, что в действительности при малых и умеренных перегревах частоты J не так малы, как полагается в теории гомогенной нуклеации [1], а при предельных перегревах ($T \geq 0.9T_c$) теоретические значения J и экспериментальные данные находятся в хорошем согласии [1]. Из опытов

следует, что для воды зависимость частоты зародышеобразования J от температуры при атмосферном давлении носит ступенчатый характер [6]. При температуре $T < 0.7T_c$ (малые и умеренные перегревы), частота $J \approx 10^2 \div 10^4 \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ - и парообразование при этом происходит на отдельных, немногочисленных и невзаимодействующих пузырьках - так называемых готовых центрах кипения.

В температурном интервале от $0.7 T_c$ до $0.9 T_c$ (высокие перегревы) частота парообразования пороговым образом возрастает до значений $J \approx 10^8 \div 10^{13} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$. Такой рост зародышей обусловлен не только увеличением пересыщения, но и переходом к интенсивному гетерогенному парообразованию. Этот механизм связан с зарождением паровой фазы на внешних включениях в жидкости (твердые частицы, растворенный газ, микроуглубления на поверхности сосуда...). При интенсивном гетерогенном зародышеобразовании часто наблюдается цепная, лавинообразная активация центров кипения. С достижением температур $T_0 \geq 0.9T_c$ (предельные перегревы) вступает в действие механизм гомогенного зародышеобразования и реализуются частоты $J \approx 10^{20} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$. Отличительной особенностью для двух последних механизмов вскипания является тот факт, что при этом образуется совокупность взаимодействующих пузырьков. Скачок на четыре порядка J для воды при $T/T_c = 0.7$ и рост частоты зародышеобразования при $T/T_c = 0.9$ связаны с переходными режимами вскипания. В данной работе использовался короткий щелевой канал, изготовленный электроискровым методом, прямоугольного сечения со сторонами 4мм и 0.2мм и длиной 0.7мм. Благодаря такой длине насадка обеспечивался резкий сброс давления со скоростью порядка $10^5 - 10^6$ МПа/с, что приводит к глубокому заходу жидкости в метастабильное состояние. Также в первой главе рассмотрена эволюция формы струи, истекающей через короткий цилиндрический канал с ростом температуры на линии насыщения. Исследование истечения перегретых однокомпонентных жидкостей в условиях взрывного вскипания [1] показали наличие кризисных явлений в поведении интегральных характеристик потока (расхода, реактивной отдачи и формы струи) [4,5]. В условиях кризисного поведения наблюдается масштабное развитие флуктуационных процессов, проявляющееся в появлении $1/f$ флуктуаций – флуктуаций, спектральная плотность мощности которых изменяется обратно пропорционально частоте [7].

Во **второй главе** «Экспериментальная установка для изучения характеристик плоских струй вскипающих жидкостей при истечении в атмосферу» описана экспериментальная установка для изучения интегральных характеристик струи (форма, реактивная отдача) вскипающей жидкости при стационарном адиабатном истечении через короткий щелевой канал. Лабораторная установка представляет собой устройство кратковременного действия, которое обеспечивало стационарный режим истечения исследуемой жидкости в атмосферу в течение нескольких десятков секунд. Основным элементом установки по истечению вскипающих жидкостей является рабочая камера высокого давления. Она имеет форму цилиндрического стакана

объемом 0.63 л. Камера подвешивается к экспериментальному стенду и представляет собой маятник в поле тяжести. По ее отклонению от положения равновесия определяется реактивное усилие истекающей жидкости. При исследовании флуктуационных процессов в плоских струях перегретых жидкостей рабочая камера жестко фиксировалась. Эксперименты проводились в широком температурном интервале от $T_0=20$ °С до $T_0=310$ °С, включая область взрывного вскипания при изменении давления до 11 МПа. Истечение жидкостей производилось при различных термодинамических условиях: с линии насыщения и при изменении температуры с фиксированным начальным давлением (по изобарам). Исследованный температурный интервал позволял реализовывать в опытах различные механизмы парообразования: вскипание на отдельных невзаимодействующих центрах, интенсивное гетерогенное зарождение паровых пузырьков, гомогенное зародышеобразование.

Относительная погрешность измерения реактивной отдачи в опытах составляла ± 10 %.

Третья глава «Экспериментальное исследование форм плоских струй вскипающих жидкостей» посвящена экспериментальному исследованию форм, как свободных, так и взаимодействующих с близко расположенной твердой стенкой вскипающих струй. В качестве стенки использовались прилегающие плоскости различных размеров, а также прижимной фланец с диффузором. Изучение форм вскипающих плоских струй в данной работе происходило как визуально, так и при анализе полученных фото- и видеоматериалов. Основное внимание уделялось тому, как изменялись угол распыла α (угол между видимыми границами струи), структура всего потока и его границ.

Исследования свободных вскипающих струй проводились при истечении их через короткий щелевой канал, выполненного на свободном конце патрубка длиной 10 мм и диаметром 10мм (по типу "пяточка"), что позволило исключить влияния внешних геометрических условий за выходным срезом канала. Эволюция формы струи перегретой воды с ростом температуры вдоль линии насыщения показана на рисунке 1.

Опыты показали, что расширение струи шло значительно быстрее в направлении меньшей стороны щелевого канала, чем в направлении большей стороны. В направлении большей стороны прямоугольного сечения канала с ростом начальной температуры жидкости угол расширения практически не изменялся с увеличением температуры и был равен $\alpha \sim 20^\circ$. А в направлении меньшей стороны канала в зависимости от степени перегрева наблюдались три характерные формы струи перегретой воды вблизи выходного сечения щелевого канала, у которого длинная сторона расположена горизонтально. При малых перегревах происходит распыление потока на капли, окруженные паровым облаком (Рисунок 1а). Струя имеет параболический вид с сильно возмущенными границами. С увеличением температуры угол распыла растет. Уже при умеренных перегревах он достигает развернутого угла $\alpha \sim 180^\circ$ (Рисунок 1б). Поток распространяется как в осевом, так и в радиальном

направлении. При высоких степенях перегрева происходит схлопывание угла распыла до $\alpha \sim 150^\circ$ (Рисунок 1в), что связано с проявлением интенсивного гетерогенного парообразования и смещением сечения вскипания внутрь канала.

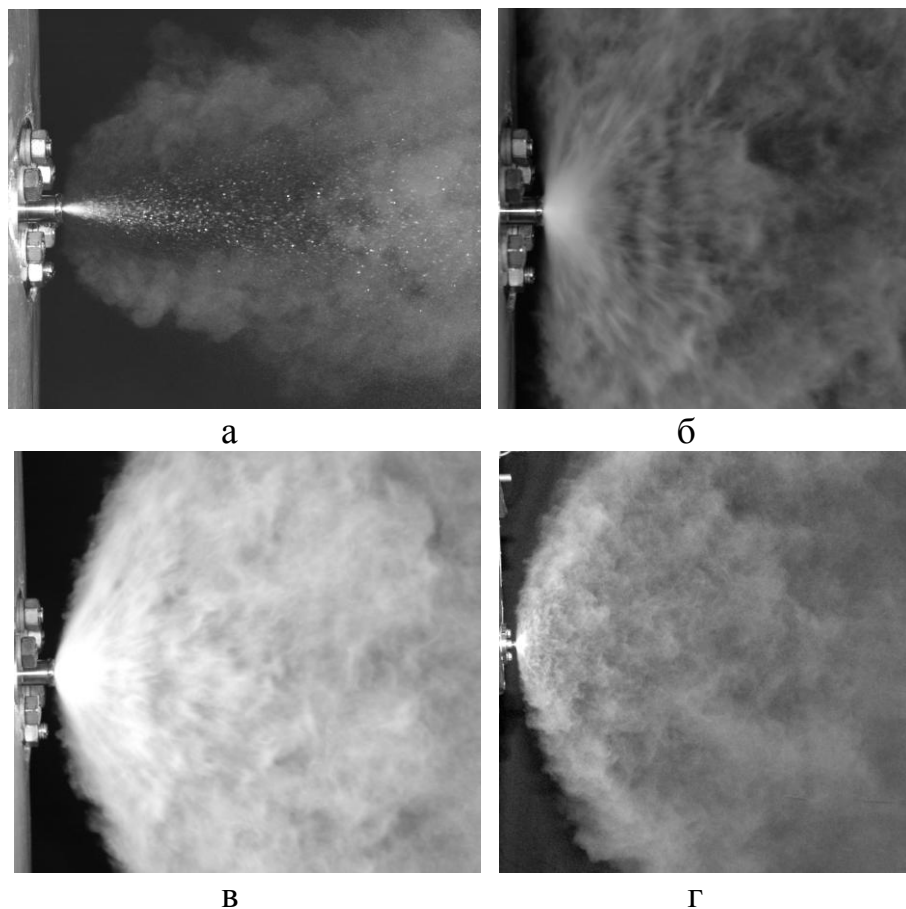


Рисунок 1 – Формы свободных струй (вид сбоку) вскипающей воды, истекающей через короткий щелевой канал при различных температурах: а) $T_s = 130^\circ\text{C}$; б) $T_s = 180^\circ\text{C}$; в) $T_s = 250^\circ\text{C}$; г) – общий вид струй на расстоянии $\sim 1.5\text{м}$ от канала, наблюдавшийся при температурах $T_s > 150^\circ\text{C}$

На первых трех фотографиях (Рисунок 1а-в.) поток изображен в масштабе 1:1. На последней фотографии (Рисунок 1г) показано истечение в более мелком масштабе 1:5. Все фотографии получены для случая, когда длинная сторона щелевого канала расположена горизонтально.

Проведенные опыты по истечению перегретых струй водных растворов этанола различных объемных концентраций (20%, 50%, 70%) через короткий щелевой канал, выполненный на свободном конце патрубка (пяточок) показали, что угол раскрытия струи вблизи выходного среза канала имеет более схлопнутый вид в сравнении со струей воды при тех же перегревах. В отличие от прямых границ струй воды, границы струй растворов имели параболическую форму. На расстоянии $\sim 1.5\text{м}$ от выходного сечения канала принципиального отличия струй перегретых жидкостей замечено не было. Они имели схожий вид, показанный на рисунке 1г.

В опытах с диффузорным прижимным фланцем угол раскрытия струи перегретых жидкостей в направлении большей стороны щелевого канала не изменился в сравнении с истечением свободной струи и был равен $\alpha \sim 20^\circ$ (Рисунок 2а). С меньшей стороны канала изменение угла раскрытия струи с

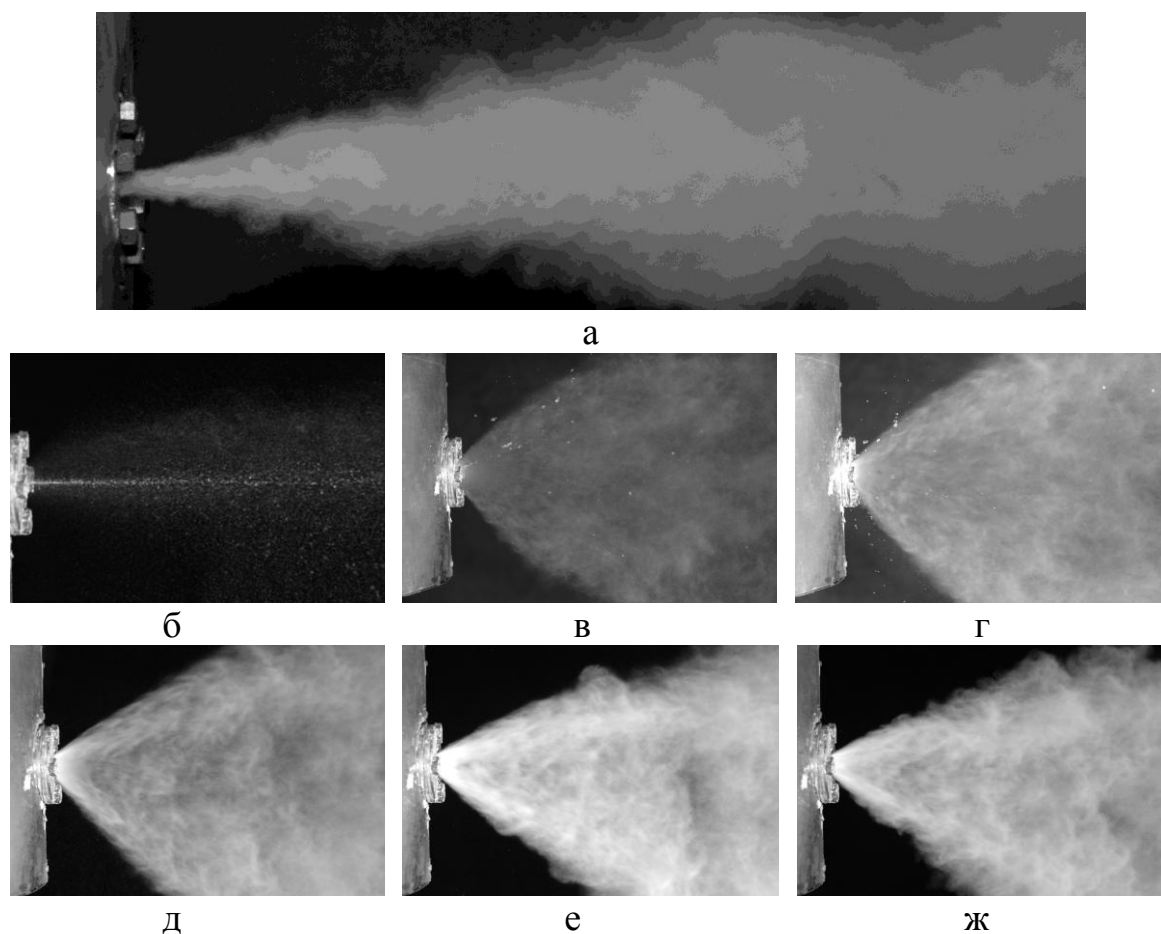


Рисунок 2 – Изменение формы струи вскипающей воды, истекающей через короткий щелевой канал, с ростом температуры: а) $T_s=200^\circ\text{C}$ (вид сверху); б) $T_s=120^\circ\text{C}$; в) $T_s=150^\circ\text{C}$; г) $T_s=180^\circ\text{C}$; д) $T_s=220^\circ\text{C}$; е) $T_s=280^\circ\text{C}$; ж) $T_s=300^\circ\text{C}$

ростом начальной температуры носит немонотонный характер (Рисунок 2б-ж). Немонотонность поведения связана с геометрией прижимного фланца, который имеет цилиндрическую, а затем диффузорную части. Эта конфигурация прижимного фланца ограничивает расширение угла струи α свыше 110° . На расстоянии одного метра от выходного сечения канала меньшая сторона струи увеличивалась примерно в 5000 раз, а большая почти в 50 раз. При малых перегревах струя распыляется на мелкие капли (Рисунок 2б). Распыление струи обусловлено как гидравлическим диспергированием через узкую щель, так и слабоинтенсивными фазовыми превращениями. С последующим повышением температуры на снимках видны отдельно летящие капли и расширяющееся паровое облако. На рисунке 2в показана струя для умеренных перегревов с максимальным углом распыла струи и крупными

каплями на ее границах. Параметры струи (температура и давление) на выходе из канала соответствовали вскипанию на отдельных центрах при частотах зародышеобразования $J \sim 10^2 \div 10^4 \text{ с}^{-1}\text{см}^{-3}$. Для перегревов $\Delta T = T_{0s} - T_s(p_a) = 80 \div 90 \text{ K}$ частота зародышеобразования испытывает скачок на несколько порядков от $10^5 \text{ см}^{-3}\text{с}^{-1}$ до $10^8 \text{ см}^{-3}\text{с}^{-1}$ - происходит переход к механизму интенсивного гетерогенного зародышеобразования. При этом капли на границах потока становятся значительно мельче, а струя структурируется: парожидкостная среда распределена неравномерно по сечению струи – значительная ее часть сосредоточена по периферии струи (Рисунок 2г,д). С дальнейшим ростом температуры капли становятся все более мелкими и, в конце концов, пропадают из виду (Рисунок 2д). Интенсивные фазовые превращения в потоке приводят к тому, что границы струи носят изрезанный характер (Рисунок 2 е,ж). Форма струи на рисунке 2ж соответствует гомогенному зародышеобразованию в потоке и угол раскрытия струи уменьшается до 60° .

При изменении начальной температуры вдоль линии с постоянным начальным давлением (изобары $p_0=3.0 \text{ МПа}$, $p_0=4.5 \text{ МПа}$) в опытах по истечению воды с диффузорным прижимным фланцем были замечены некоторые отличия в форме струи по сравнению со струями, истекающими с линии насыщения. Отличия заключались в изменении структуры и угла распыла струи. Границы струи при изобарических условиях для тех же температур, что и на линии насыщения, были более возмущенными. Угол раскрытия уже при малых перегревах был развернутым до $\alpha \sim 180^\circ$. С дальнейшим повышением температуры вдоль изобар для всех исследованных жидкостей угол распыла оставался развернутым. На больших расстояниях от выхода из канала отличий форм струй замечено не было.

Общая черта струй исследованных жидкостей состояла в том, что реализация интенсивного гетерогенного зародышеобразования приводила к существенному перераспределению парожидкостной среды на периферию струи. При исследовании струй вскипающей воды, этанола и водных растворов этанола, истекающих через короткий щелевой канал с диффузорным прижимным фланцем при изменении температуры, как вдоль линии насыщения, так и по изобарам, кризисного поведения формы потока замечено не было.

Также было проведено изучение вскипающих плоских струй с использованием фланца, обеспечивающего истечение свободных струй, с добавлением внешних поверхностей, плоскость которых совпадала с выходным сечением щелевого канала. В опытах большая сторона канала располагалась горизонтально. Прилегающие (смежные) плоскости имели следующие размеры: $500 \times 360 \text{ мм}$, $250 \times 360 \text{ мм}$, $100 \times 360 \text{ мм}$ (первое число соответствует вертикальному размеру плоскости, второе – горизонтальному). Применение данных плоскостей позволило обнаружить некоторые особенности при

истечении перегретых жидкостей. Установление плоскости с наименьшей площадью не выявило принципиального различия в формах струй от струй жидкостей, истекающих из щелевого канала с применением этого фланца без смежной плоскости (Рисунок 1). Отличия обнаружались при использовании плоскости со средней площадью. При небольших перегревах поток никак не взаимодействовал с плоскостью. Для верхней температурной границы малых перегревов струя имела развернутый угол распыла – наблюдалось ее прилипание к внешней поверхности (эффект Коанда). Струя, “захваченная” смежной плоскостью, распространялась в вертикальном направлении до ее верхней границы. Затем отрывалась и двигалась как в радиальном, так и в осевом направлении. При умеренных и высоких перегревах струя продолжала свое течение в вертикальном направлении даже после прохождения верхней границы примыкающей поверхности. Вверх, от границы плоскости, поток распространялся на расстояние нескольких десятков сантиметров. При этом уменьшилось ее распространение в горизонтальном направлении от ~2м до 0.5м.

На рисунке 3 показано как изменялась форма струи перегретых жидкостей для плоскости с самой большой площадью. Для низких перегревов ($T_{0s} < 130$ °С) происходило слабое взаимодействие потока с прилегающей плоскостью (Рисунок 3а). В случае прилипания потока к поверхности, он распространялся вдоль нее в радиальном направлении на расстояние примерно до середины плоскости. С ростом температуры и давления струя жидкости приобретает структурированный вид с рядом выделенных радиальных направлений (Рисунок 3б). В переходном режиме вскипания (от единичных невзаимодействующих центров к интенсивному гетерогенному зародышеобразованию) струя перегретой жидкости, “захваченная” внешней поверхностью, распространяется преимущественно в вертикальном направлении, а горизонтальное распространение потока уменьшается (Рисунок 3в). С дальнейшим перегревом жидкости сечение вскипания все ближе смещается в сторону выходного сечения канала и распространение струи в горизонтальном направлении практически отсутствует (Рисунок 3г) – полное раскрытие струи. Взаимодействие вскипающей струи с внешней прилегающей плоскостью становится настолько сильным, что подавляющая масса всего потока распространяется в радиальном направлении. При приближении к предельным перегревам вновь начинает расти осевая составляющая струи. В вертикальном направлении струя жидкости течет лишь до границ прилегающей плоскости (Рисунок 3д). При переходе от интенсивного гетерогенного зародышеобразования к гомогенному флуктуационному, вскипающий поток приобретает схлопнутый вид и истечение происходит преимущественно в осевом направлении (Рисунок 3е). При изменении начальной температуры вдоль линии с постоянным начальным давлением (изобара) были зафиксированы смещения температурных границ переходов от одной формы струи к другой. Форма вскипающей воды, показанная на рисунке

Зг, для изобары $p_0=4.5$ МПа наблюдалась при температуре $T_0=240$ °С, а в случае истечения с линии насыщения при $T_s=210$ °С. Также вид струи, показанный на рисунке 3д, был замечен при температуре $T_0=260$ °С (для линии насыщения – $T_s=240$ °С). Преимущественное распространение потока в вертикальном направлении, приведенное на рисунках 3г, д, в условиях изобарического истечения при более высоких температурах происходило вследствие повышения скорости течения и увеличения адиабатического охлаждения жидкости.

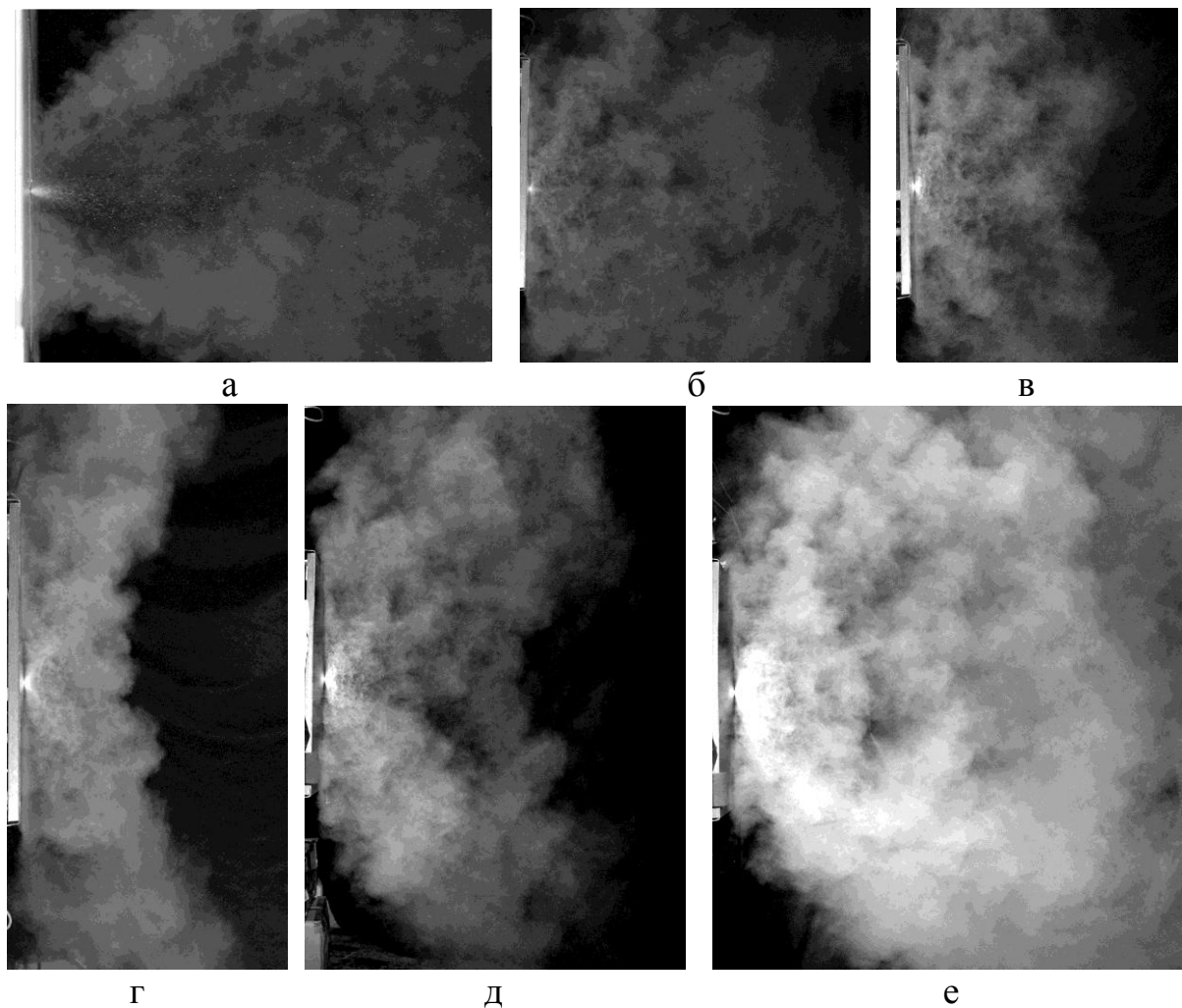


Рисунок 3 – Формы струи вскипающей жидкости, истекающей через короткий щелевой канал с максимальной внешней прилегающей плоскостью при различных перегревах: а) $\Delta T < 30K$; б) $30K < \Delta T < 60K$; в) $60K < \Delta T < 100K$; г) $100K < \Delta T < 120K$; д) $120K < \Delta T < 190K$; е) $\Delta T > 190K$

Таким образом, в опытах по истечению горячих жидкостей через короткий щелевой канал показано, что различным перегревам в потоке соответствуют разные механизмы парообразования. Малым и умеренным перегревам отвечает вскипание на отдельных, немногочисленных и невзаимодействующих центрах, высоким – интенсивное гетерогенное зародышеобразование, предельным перегревам – вскипание на гомогенных

центрах. Это находит отражение в эволюции формы вскипающей струи: при истечении через щелевой канал с ростом перегрева струя проходит от формы, характерной для гидравлического диспергирования (малые перегревы), через полное раскрытие струи к параболической форме струи.

В четвертой главе «Экспериментальное исследование реактивной силы струи вскипающих жидкостей при истечении через щелевой канал» приведены результаты экспериментального изучения зависимости реактивной отдачи плоских струй от начальных параметров (T_0 , p_0), которые изменялись в широком диапазоне, включающем область взрывного вскипания, и соответствовали линии насыщения и линиям с постоянным начальным давлением (изобары).

Опытные данные реактивной тяги сравнивались с расчетными значениями для холодной жидкости (гидравлическое приближение)

$$R = 2\mu S \Delta p$$

и для критического истечения газа в атмосферу с использованием приближения идеального газа (газовое приближение)

$$R_r = \mu_r S \left\{ p_0 \left[\left(\frac{2\gamma^2}{\gamma+1} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \right] - p_a \right\}$$

Здесь S – площадь канала, из которого происходит истечение, μ и μ_r – гидравлический и газовый коэффициенты расхода, p_0 – давление внутри сосуда, p_a – внешнее (атмосферное) давление, $\Delta p = p_0 - p_a$, γ – коэффициент адиабаты.

На рисунке 4 представлены результаты экспериментального изучения реактивной силы воды, этанола и 50% (об.) водного раствора этанола, полученные с диффузорным прижимным фланцем. Для воды наблюдается хорошее совпадение экспериментальных данных с гидравлическим приближением до давлений $p_s < 1.5$ МПа ($T_s < 200$ °С). При дальнейшем росте давления вдоль линии насыщения экспериментальные данные превосходят значения реактивной отдачи струи, рассчитанной в гидравлическом приближении, примерно на 30%. Эта особенность в поведении реактивной тяги связана с реализацией в струе интенсивного гетерогенного режима вскипания.

Величина реактивной силы перегретого этанола для начальных температур, далеких от термодинамической критической точки описывается гидравлическим приближением. При гомогенном флуктуационном вскипании этанола наблюдается снижение величины реактивной отдачи струи от гидравлических значений до значений, рассчитанных в газовом приближении. Экспериментальные данные реактивной отдачи струи 50% водного раствора этанола при температурах меньших термодинамической критической для легкокипящего компонента принимают промежуточные значения между гидравлическим и газовым приближениями. При температурах превышающих

термодинамическую критическую температуру этанола величина реактивной отдачи возрастает до значений, рассчитанных в гидравлическом приближении.

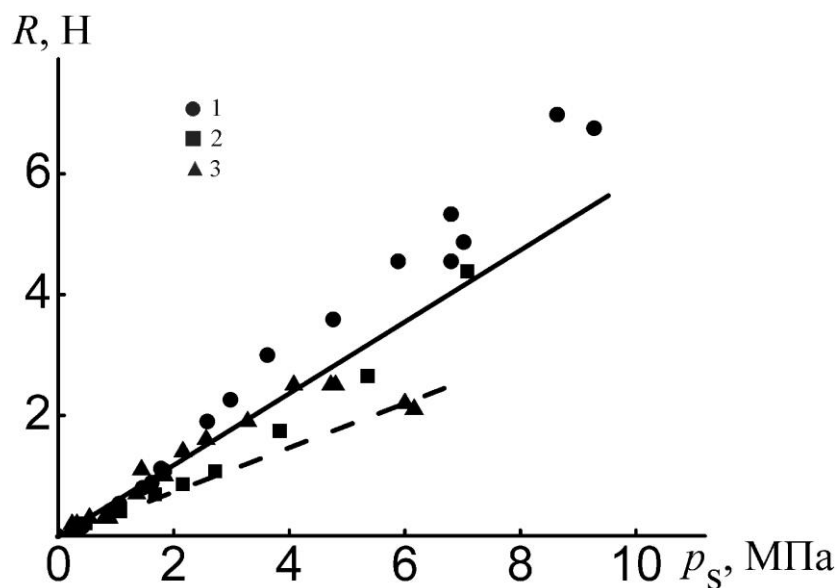


Рисунок 4 – Зависимость реактивной отдачи плоских струй перегретых жидкостей от начального давления, изменяющегося вдоль линии насыщения при использовании прижимного фланца с диффузором: 1 - вода; 2 - 50% водный раствор этанола; 3 - этанол. Сплошная и пунктирная линии – гидравлическое и газовое приближения, соответственно

Опыты, проведенные с фланцем, обеспечивающим свободное течение струй, показали, что данные измерений реактивной отдачи струй перегретых жидкостей совпадают с гидравлическим приближением, как показано на рисунке 5. При установлении прилегающих плоскостей в сечении выходного среза короткого щелевого канала наблюдались существенные изменения, как в поведении формы, так и реактивной отдачи плоской струи.

Экспериментальные данные реактивной тяги, полученные для плоскости с наименьшей площадью, хорошо согласуются с газовым приближением. Для средней плоскости точки лежат существенно ниже прямой, рассчитанной в газовом приближении. С увеличением температуры различия между экспериментальными значениями и расчетом становятся все больше. Расхождение опытных данных от теоретических обусловлено тем, что с ростом перегрева происходит все более сильное взаимодействие “прилипание” вскипающей струи с плоскостью – парожидкостная смесь движется нормально по отношению к оси струи. Это приводит к снижению статического давления в области обтекания и обуславливает уменьшение реактивной силы. Особенно сильное уменьшение статического давления происходит в опытах с плоскостью, имеющей наибольшую площадь. Это уменьшение связано с перестройкой структуры потока, которая показана на рисунке 3а-г. С ростом перегрева уменьшается осевая составляющая потока и увеличивается радиальная, обусловленная эффектом Коанда. В случае прилегающей

плоскости наибольшего размера реактивная отдача имела практически постоянную малую величину до температуры ($T_s=210$ °С). При более высоких температурах увеличивалась осевая составляющая струи (Рисунок 3д), что приводило к резкому росту реактивной силы до значений газового приближения (Рисунок 5).

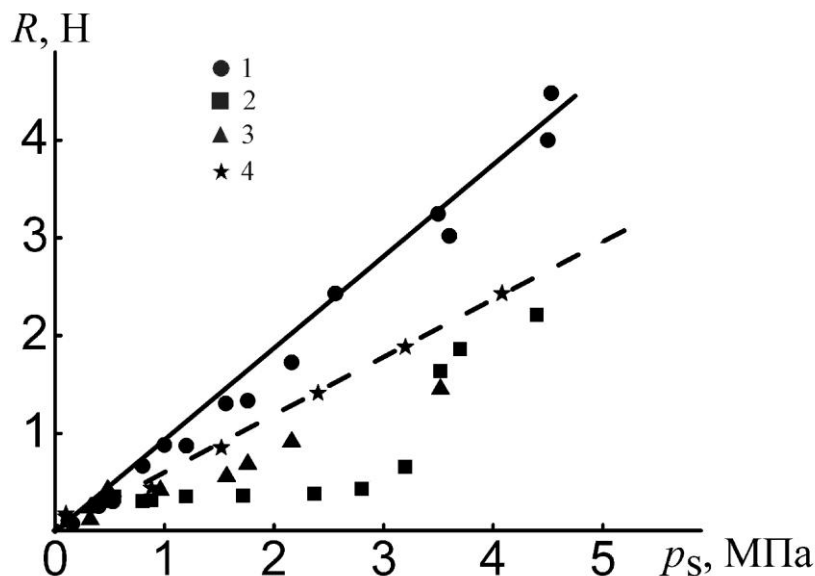


Рисунок 5 – Зависимость реактивной отдачи струи перегретой воды от начального давления на линии насыщения при различных внешних геометрических условиях за каналом: 1 – отсутствие плоскости; 2 – плоскость размером 500×360 мм; 3 – плоскость размером 250×360 мм; 4 – плоскость размером 100×360 мм. Сплошная и пунктирная линии – гидравлическое и газовое приближения, соответственно

В экспериментах, в которых температура изменялась вдоль линий с постоянным начальным давлением, было зафиксировано увеличение реактивной силы относительно гидравлического приближения (Рисунок 6). Эксперименты проводились при использовании диффузорного прижимного фланца. Из графика видно, что рост реактивной тяги для обеих изобар происходит при одной и той же температуре $T_0=185$ °С ($T/T_c = 0.7$). Для воды при данной температуре наблюдается резкое увеличение экспериментальных значений частоты зародышеобразования J [6]. Отметим также то, что при увеличении реактивной тяги экспериментальные данные для обеих изобар изменяются практически на одну и ту же величину. Рост реактивной тяги относительно гидравлического приближения наблюдался и в опытах по истечению этанола и его водных растворов при постоянном начальном давлении. Увеличение динамической реакции струй, как и в опытах с водой, наблюдалось при реализации в потоке взрывного вскипания.

Кризисное поведение реактивной тяги плоских струй вскипающих жидкостей было также обнаружено в опытах, проведенных с наибольшей

прилегающей плоскостью, совпадающей с сечением выходного среза короткого щелевого канала. Кризисное поведение заключалось в резком уменьшении реактивной отдачи струи воды для двух изобар ($p_0=3.0$ и 4.5 МПа). Результаты опытов показаны на рисунке 7.

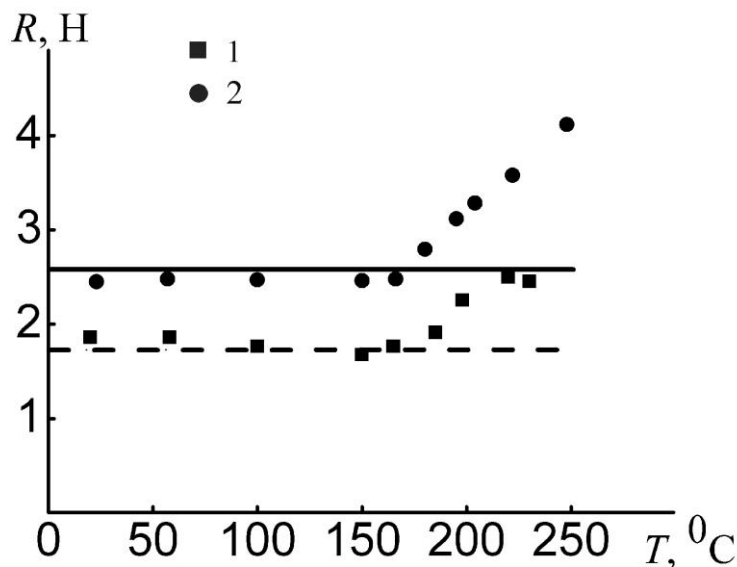


Рисунок 6 – Зависимость реактивной отдачи плоских струй перегретой воды от температуры на изобарах ($p_0=3.0$ и 4.5 МПа) при использовании прижимного фланца. 1 – данные на изобаре $p_0=3.0$ МПа; 2 - данные на изобаре $p_0=4.5$ МПа. Сплошная и пунктирная линии – гидравлические приближения для большей и меньшей изобар, соответственно

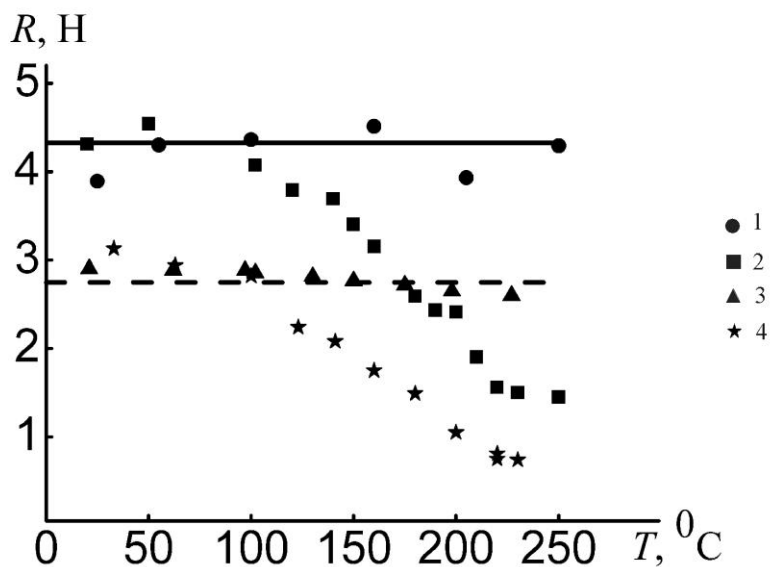


Рисунок 7 – Зависимость реактивной отдачи плоских струй перегретой воды от температуры на изобарах (3.0 и 4.5 МПа): 1,3 – данные при истечении воды через фланец, обеспечивающий условия истечения свободной струи; 2,4 – при использовании внешней прилегающей плоскостью площадью 500×360 мм. 1 и 2 – результаты для изобары $p_0=4.5$ МПа, 3 и 4 - для изобары $p_0=3.0$ МПа. Сплошная и пунктирная линии – гидравлический расчет для большей и меньшей изобар, соответственно

Как видно из графика, снижение реактивной силы происходило с температуры, равной температуре кипения. В температурном интервале от $T_0=100\text{ }^\circ\text{C}$ до $T_0=220\text{ }^\circ\text{C}$ значения реактивной тяги уменьшились в 3 раза для обеих изобар, что указывает на кризисное поведение реакции струи. В отсутствие примыкающей плоскости за щелевым каналом экспериментальные данные находятся в неплохом согласии с гидравлическими приближениями.

Проведенные исследования с водными растворами этанола при использовании максимальной прилегающей плоскости показали, что, как и в опытах с водой, величина реактивной отдачи струи при малых перегревах ($T_s < 150\text{ }^\circ\text{C}$) описывается газовым приближением. С ростом перегрева жидкостей наблюдалось резкое уменьшение величин реактивной отдачи по сравнению со значениями, рассчитанными в газовом приближении. Опыты показали, что реактивная отдача вскипающих плоских струй этанола и его водных растворов, имела кризисное поведение. Эксперименты с водными растворами этанола выявили уменьшение реактивной силы не только в случае с прилегающей плоскостью, но и при ее отсутствии. Например, при истечении перегретого 70% водного раствора этанола через щелевой канал фланца, обеспечивающего истечение свободных струй, экспериментальные значения реактивной отдачи совпадали с гидравлическим приближением до температуры $T_0=150\text{ }^\circ\text{C}$ ($T/T_c = 0.74$), а затем снижались до газового приближения (Рисунок 8).

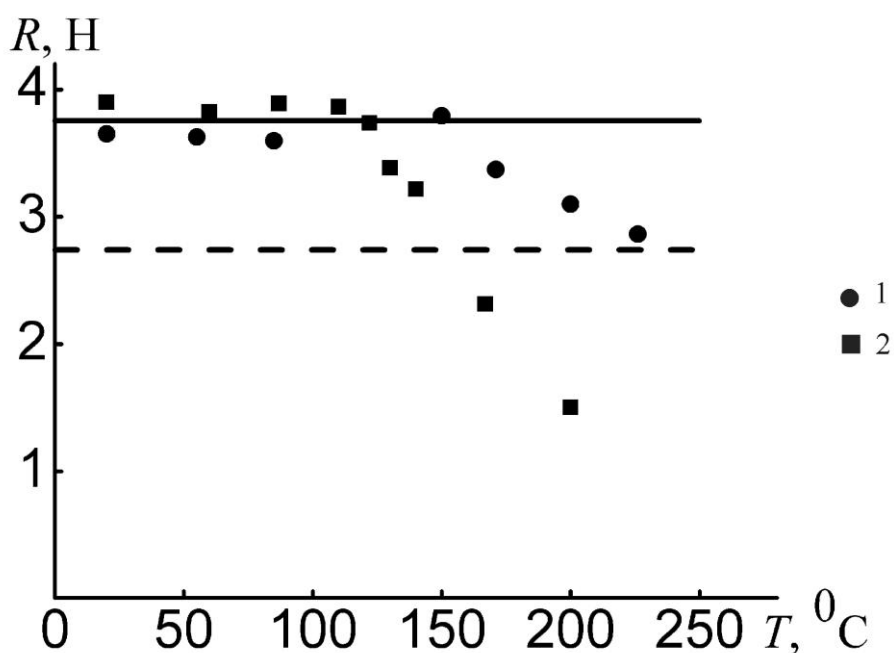


Рисунок 8 – Зависимость реактивной отдачи струи перегретого 70% водного раствора этанола от температуры на изобаре $p_0=4.0\text{ МПа}$: 1 – в отсутствие поверхности за коротким щелевым каналом; 2 – с внешней прилегающей плоскостью площадью $500 \times 360\text{ мм}$. Сплошная и пунктирная линии – гидравлическое и газовое приближения, соответственно

С использованием прилегающей плоскости уменьшение реактивной тяги происходило при меньших температурах и, как в опытах с водой, значительно более резко.

Сопоставление результатов экспериментального изучения истечения вскипающих жидкостей через короткие цилиндрический и щелевой каналы показало, что для обоих видов каналов наблюдается кризисное поведение реактивной отдачи струи. В обоих случаях необходимым условием для проявления кризиса являлось наличие прилегающей плоскости за выходом из канала. Отличие состояло в температурных интервалах этого явления. Для цилиндрического канала кризис имел место в интервале от 210 °С до 300 °С, а для щелевого – для более низких температур: от 150 °С до 240 °С. Для обоих каналов кризису отдачи струи соответствовало полное раскрытие струи: струя преимущественно растекалась вдоль прилегающей плоскости – в радиальном направлении. Если для цилиндрического канала радиальное растекание происходило равномерно по всем азимутальным углам, то для щелевого канала – только в направлении, параллельном меньшей стороне щелевого канала.

Пятая глава «Флуктуационные процессы в потоке вскипающей плоской струи» посвящена изучению флуктуаций параметров потока. В процессе наблюдений за струями вскипающей воды и водных растворов этанола, истекающих через короткий канал прямоугольного сечения, были установлены не только характерные формы струи при определенных механизмах вскипания, но и отмечены значительные пульсации параметров потока. В частности, заметно флуктуировали угол раскрытия струи, локальная плотность истекающей двухфазной среды и длина жидкого ядра струи от выходного среза канала до сечения интенсивного вскипания.

Измерения интенсивности пульсаций производились методом фотометрии лазерного излучения прошедшего через струю в поперечном направлении. Лазерный луч толщиной 1 мм имел линейную развертку до 70 мм и проходил через струю на расстоянии 20 мм за выходным срезом канала. Колебания интенсивности лазерного луча фиксировались с помощью фотодиода и записывались в компьютер. По полученным временным рядам данных методом Фурье-преобразования определялись спектры мощности пульсаций и функции амплитудного распределения флуктуаций.

Пульсации с $1/f$ спектром мощности были обнаружены в кризисных и переходных режимах кипения, при акустической кавитации, в колебательных режимах горения и др. Возникновение таких пульсаций связывается с одновременным протеканием различных неравновесных фазовых переходов в сложных системах с развитой флуктуационной природой [7]. Согласно предложенной и подтвержденной опытными исследованиями модели в работе [7] спектральные характеристики флуктуационных процессов в струе могут служить инструментом для поиска переходных режимов кипения и переходов в поведении струи. Поэтому, в проведенных нами опытах, спектры мощности с $1/f$ зависимостью использовались в качестве индикатора для обнаружения

переходных режимов вскипания между различными механизмами парообразования. Так переходный режим от вскипания на отдельных невзаимодействующих центрах кипения к интенсивному парообразованию на многочисленных гетерогенных центрах наблюдался в температурном интервале 145 °С – 155 °С. Подобная картина наблюдалась и при переходе от интенсивного гетерогенного парообразования к гомогенному флуктуационному вскипанию в интервале 285 °С – 290 °С. В обоих случаях переходных режимов кипения спектр мощности имел вид, изображенный на рисунке 9.

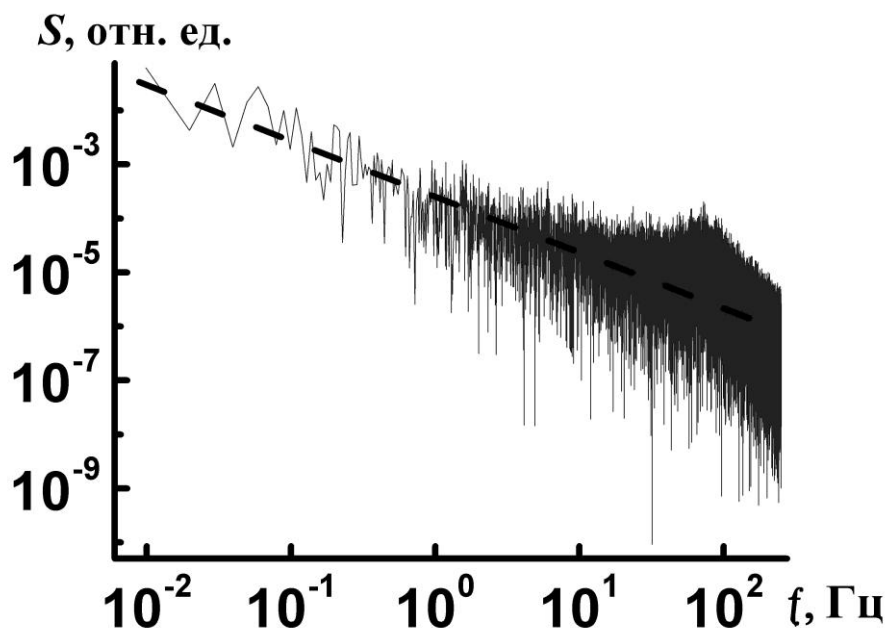


Рисунок 9 – Спектр мощности пульсаций в струе вскипающей воды. Пунктирная линия – $1/f$ зависимость

При других температурах спектр мощности флуктуаций в области низких частот не зависел от частоты, т.е. имел вид спектра белого шума. Также $1/f$ спектры наблюдались при переходе к полному раскрытию струи и обратно. Опыты проводились как с вертикальным расположением щелевого канала, так и с горизонтальным. Спектры мощности флуктуаций для обоих случаев совпадали.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено комплексное экспериментальное исследование динамических характеристик струй (форма, реактивная сила, флуктуационные процессы) перегретых воды, этанола и водных растворов этанола при истечении через короткий щелевой канал из камеры высокого давления.

Основные результаты и выводы:

1. Проведено экспериментальное исследование динамической реакции струй перегретых жидкостей (вода, этанол, водные растворы этанола) при

истечении их через короткий щелевой канал в широком температурном интервале от 20 °С до 310 °С при изменении давления до 11 МПа.

2. Выделены характерные формы и структуры вскипающей струи, соответствующие разным степеням начального перегрева жидкости (малым, умеренным, высоким и предельным) и различным механизмам парообразования (кипение на одиночных не взаимодействующих центрах, интенсивное гетерогенного парообразования, гомогенное флуктуационное вскипание) при истечении через короткий щелевой канал

3. Определены геометрические условия за выходом из канала, приводящие к полному раскрытию струи.

4. Установлено, что при полном раскрытии струи наблюдается резкое уменьшение величины реактивной отдачи струи вскипающей жидкости – кризисное поведение реактивной отдачи.

5. Найдено, что реактивная отдача струи перегретой жидкости превосходит отдачу гидравлического истечения в условиях интенсивного гетерогенного парообразования при диффузорных геометрических условиях за выходом из канала.

6. Определены спектры мощности пульсаций в различных режимах истечения. Установлена связь низкочастотных пульсаций с $1/f$ – спектром мощности и переходными режимами вскипания: переход от одиночных центров кипения к интенсивному гетерогенному парообразованию и от интенсивного гетерогенного парообразования к гомогенному флуктуационному вскипанию.

МАТЕРИАЛЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

А1. Бусов, К.А. Динамические характеристики вскипающих струй перегретых водных растворов / А.В. Решетников, Н.А. Мажейко А.В. Виноградов, К.А. Бусов, В.П. Коверда // Теплоэнергетика. – 2010. – № 8. – С. 69-73 (0.31 п.л. / 0.1 п.л.).

А2. Бусов, К.А. Динамические характеристики струй перегретой воды при истечении через короткие каналы / К.А. Бусов // Тепловые процессы в технике. – 2011. – Т. 3. – № 7. – С. 308-313 (0.31 п.л. / 0.2 п.л.).

А3. Бусов, К.А. Переходные режимы вскипания струй перегретой воды / А.В. Решетников, К.А. Бусов, Н.А. Мажейко, В.Н. Скоков, В.П. Коверда // Теплофизика и аэромеханика. – 2012. – Т. 19. – № 3. – С. 359-367 (0.56 п.л. / 0.1 п.л.).

А4. Бусов, К.А. Взрывное вскипание и полный развал струи перегретой воды / А. В. Решетников, В. В. Роевко, Н. А. Мажейко, В. П. Коверда, С. П. Храмцов, К. А. Бусов, А. В. Пряничников // Тепловые процессы в технике. – 2013. – № 7. – С. 295-302 (0.50 п.л. / 0.1 п.л.).

A5. Busov, K.A. Disintegration of Flows of Superheated Liquid Films and Jets / A.N. Pavlenko, V.P. Koverda, A.V. Reshetnikov, A.S. Surtaev, A.N. Tsoi, N.A. Mazheiko, K.A. Busov, V.N. Skokov // Journal of Engineering Thermophysics. – 2013. – V. 22. – № 3. – P. 174–193 (1.25 п.л. / 0.1 п.л.).

Другие публикации:

A6. Бусов, К.А. Динамические характеристики струй перегретой воды / К.А. Бусов, А.В. Решетников, Н.А. Мажейко // 11 всероссийская молодежная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества: тез. докл. Екатеринбург, 15-21 ноября, 2010 г. – Екатеринбург: ИФМ, 2010. – С. 188 (0.06 п.л. / 0.03 п.л.).

A7. Бусов, К.А. Кризисные явления в струе вскипающих водных растворов / А.В. Решетников, Н.А. Мажейко, К.А. Бусов, В.П. Коверда, В.В. Роечко // Пятая Российская национальная конференция по теплообмену РНКТ-5: тез. докл. Москва, 25-29 октября, 2010 г. – М.: МЭИ, 2010. – С. 153-156 (0.25 п.л. / 0.1 п.л.).

A8. Бусов, К.А. Динамические характеристики струй перегретой воды при истечении через короткие каналы / К.А. Бусов // XVIII Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева “Проблемы газодинамики и тепломассообмена в новых энергетических технологиях”: тез. докл. Звенигород, 23-27 мая, 2011 г. – М.: МЭИ, 2011. – С. 165-166 (0.06 п.л. / 0.03 п.л.).

A9. Бусов, К.А. Изучение формы струи перегретых жидкостей при истечении через короткий щелевой канал / К.А. Бусов, А.В. Решетников, Н.А. Мажейко // 12 всероссийская молодежная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества: тез. докл. Екатеринбург, 14-20 ноября, 2011. – Екатеринбург: ИФМ, 2011. – С. 141 (0.06 п.л. / 0.01 п.л.).

A10. Бусов, К.А. Реактивная сила струи перегретых жидкостей при истечении через щелевой канал / К.А. Бусов, А.В. Решетников, Н.А. Мажейко // XIV Минский международный форум по тепло- и массообмену Минск, 10-13 сентября, 2012 г. – Минск.: ИТМО НАНБ, 2012. – С. 426-429 (0.06 п.л. / 0.03 п.л.).

A11. Бусов, К.А. Взрывное вскипание в струях перегретых жидкостей при истечении через щелевой канал / А.В. Решетников, К.А. Бусов, Н.А. Мажейко, В.П. Коверда // XIV Минский международный форум по тепло- и массообмену Минск, 10-13 сентября, 2012 г. – Минск.: ИТМО НАНБ, 2012. – С. 587-589 (0.06 п.л. / 0.01 п.л.).

A12. Бусов, К.А. Истечение струи перегретой воды из короткого щелевого канала при различных внешних геометрических условиях / К.А. Бусов, А.В. Решетников, Н.А. Мажейко // 13 всероссийская молодежная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества: тез.

докл. Екатеринбург, 7-14 ноября, 2012 г. – Екатеринбург: ИФМ, 2011. – С. 205 (0.06 п.л. / 0.03 п.л.).

A13. Бусов, К.А. Вскипание перегретой воды при истечении через короткий щелевой канал / К.А. Бусов, А.В. Решетников, Н.А. Мажейко, А.С. Суртаев // XIX Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева "Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках": тез. докл. Орехово-Зуево, 20-24 мая, 2013 г. – М.: МЭИ, 2013. – С. 241-242 (0.06 п.л. / 0.03 п.л.).

A14. Бусов, К.А. Распыл перегретой жидкости при истечении через короткий щелевой канал / Н.А. Мажейко, А.В. Решетников, К.А. Бусов // VIII Всероссийский семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике: тез. докл. Екатеринбург, 12-14 ноября, 2013 г. – Екатеринбург: ИПЦ УрФУ, 2013. – С. 102 (0.06 п.л. / 0.01 п.л.).

A15. Бусов, К.А. Взрывное вскипание в потоках горячей жидкости / А.В. Решетников, В.П. Коверда, Н.А. Мажейко, К.А. Бусов // VIII Всероссийский семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике: тез. докл. Екатеринбург, 12-14 ноября, 2013 г. – Екатеринбург: ИПЦ УрФУ, 2013. – С. 134 (0.06 п.л. / 0.01 п.л.).

A16. Бусов, К.А. Реактивная отдача струй перегретых жидкостей при истечении через щелевой канал / К.А. Бусов, А.В. Решетников, Н.А. Мажейко // VIII Всероссийский семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике: тез. докл. Екатеринбург, 12-14 ноября, 2013 г. – Екатеринбург: ИПЦ УрФУ, 2013. – С. 205 (0.06 п.л. / 0.03 п.л.).

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скрипов, В.П. Метастабильная жидкость / В.П. Скрипов. – М.: Наука, 1972. – 312 с.
2. Eggers, J. Physics of liquid jets / J.Eggers, E.Villermaux // Rep. Prog. Phys. – 2008. – V.71. – P. 1-79.
3. Решетников, А. В. Взрывное вскипание и полный развал струи перегретой воды / А. В. Решетников, В. В. Роевко, Н. А. Мажейко, В. П. Коверда, С. П. Храмцов, К. А. Бусов, А. В. Пряничников // Тепловые процессы в технике. – 2013. – № 7. – С. 295-302.
4. Решетников, А.В. Струи вскипающих жидкостей / А.В. Решетников, Н.А. Мажейко, В.П. Скрипов // ПМТФ. – 2000. – Т.41. – № 3. – С. 125-132.
5. Хлесткин Д.А. Определение расходов метастабильной жидкости / Д.А. Хлесткин // Теплоэнергетика. – 1978. – № 1. – С. 78-80.
6. Павлов, П.А. Динамика вскипания сильно перегретых жидкостей П.А. Павлов. – С.: УрО АН СССР, 1988. – 244 с.
7. Коверда, В.П. $1/f$ – шум в критическом неравновесном фазовом переходе / В.П. Коверда, В.Н. Скоков, В.П. Скрипов // Письма в ЖЭТФ. – 1996. – Т.63. – № 9. – С. 739-742.

Копировальный центр «Таймер»
г. Екатеринбург, ул. Луначарского, д. 136
Заказ № _____. Тираж 120 экз.