

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Гасанов Байрамали Мехрали оглы

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ
КИПЕНИЯ ЭМУЛЬСИЙ С НИЗКОКИПЯЩЕЙ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗОЙ**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Екатеринбург – 2021

Работа выполнена в лаборатории криогеники и энергетики ФГБУН Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук

Официальные оппоненты: **ВАРАКСИН Алексей Юрьевич**,
доктор физико-математических наук,
профессор, член-корреспондент РАН, ФГБУН
Объединенный институт высоких температур
Российской академии наук, г. Москва,
заведующий лабораторией физического
моделирования двухфазных течений;
Попель Петр Станиславович,
доктор физико-математических наук,
профессор, ФГБОУ ВО «Уральский
государственный педагогический университет»,
профессор кафедры физики, технологии и
методики обучения физике и технологии;
Щеклеин Сергей Евгеньевич,
доктор технических наук, профессор, ФГАОУ
ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.
Ельцина», заведующий кафедрой атомных
станций и возобновляемых источников энергии.

Защита диссертации состоится «24» сентября 2021 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета УрФУ 01.03.15 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»: <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=2453>.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Ищенко Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Эмульсии представляют собой смесь из двух взаимно нерастворимых жидкостей, в которых капельки дисперсной фазы распределены в непрерывной дисперсионной среде. Рассматриваются эмульсии, у которых капельки дисперсной фазы имеют температуру кипения ниже температуры кипения дисперсионной среды. Механизм кипения эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой отличается от кипения однородных жидкостей и является достаточно сложным как для экспериментальных, так и теоретических исследований.

Кипение жидкостей как эффективный способ отвода тепла, широко используется в различных энергетических устройствах и теплообменных аппаратах. Для интенсификации теплоотдачи и повышения критических тепловых потоков применяются традиционные методы интенсификации теплообмена, такие как: увеличение площади теплоотдающей поверхности, использование нано- и микрошероховатых поверхностей для увеличения интенсивности образования и отрыва пузырьков пара, кипение в условиях вынужденного течения жидкости, турбулизация и закрутка потока и др. Интенсифицировать теплообмен при кипении можно и путем введения в теплоноситель различных добавок в виде твердых, жидких и газообразных веществ (наночастиц, поверхностно-активных веществ, высокомолекулярных соединений и др.).

Принципиально иной подход решения задачи интенсификации теплоотдачи к жидкому теплоносителю связан с введением в него нерастворимой низкокипящей жидкости и образованием из полученной смеси эмульсии, причем внутренней, дисперсной фазой эмульсии, является вводимая добавка. Режим конвективного теплообмена у таких эмульсий мало отличается от аналогичного режима дисперсионной среды. При пузырьковом кипении проявляется ряд особенностей: высокие перегревы капелек дисперсной фазы, широкие, по сравнению с однокомпонентными жидкостями, интервалы пузырькового кипения, высокие значения коэффициента теплоотдачи от нагревателя к эмульсии при температурах ниже температуры кипения дисперсионной среды. На характер теплообмена при кипении эмульсии оказывает влияние концентрация и размер капелек дисперсной фазы.

С развитием новых технологий, в различных областях техники наблюдается миниатюризация теплообменных устройств с малыми каналами (мини и микро размеров) для подвода или отвода теплоты. Использование эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой в качестве теплоносителя в таких устройствах может оказаться эффективным способом охлаждения теплонапряженных элементов.

Степень разработанности проблемы исследования

На сегодняшний день достаточно хорошо изучен предельный случай взрывного вскипания жидкости, возникающий при температурах близких к температурам предельного перегрева [1-4]. Недостаточно изучен механизм

взрывного вскипания жидкости при ее малых перегревах, когда лавинообразно активируются готовые центры кипения. Выявления механизмов активации центров гетерогенной природы остается важной задачей физики кипения.

Теплообмен при кипении эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой исследован в ряде работ [5-10]. В этих работах отмечаются особенности кипения эмульсий на различных поверхностях нагрева. В работах [11-12] численно моделируется процесс пузырькового кипения эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой. Недостаток модели состоит в том, что ее трудно реализовать, так как она требует больших вычислительных затрат и содержит много упрощающих допущений. При построении модели пузырькового кипения эмульсий основной проблемой является выявление закономерностей зародышеобразования как на теплоотдающей поверхности, так и тепловом пограничном слое. Для этого необходима визуализация процесса пузырькового кипения с применением скоростной видеосъемки, что в эмульсиях затруднено из-за их непрозрачности.

Для выявления механизма взрывного вскипания капелек эмульсии на низкотемпературных центрах кипения и практического применения этого способа интенсификации теплообмена, необходимо подобрать жидкости пригодные в качестве добавок, определить интервалы концентраций и температур, в которых проявляется эффект интенсификации теплоотдачи. Также актуально получить в эксперименте характеристики теплообмена и структуры режимов двухфазного потока при кипении в условиях вынужденного течения эмульсий в миниканале. Решению этих взаимосвязанных задач посвящена настоящая работа.

Цель работы – экспериментальные исследования взрывного вскипания диспергированной жидкости на низкотемпературных центрах кипения и теплоотдачи к эмульсиям с низкокипящей дисперсной фазой при их кипении в условиях свободной конвекции и в вынужденном потоке в миниканале. Для достижения поставленной цели решались следующие основные **задачи**:

1. Создать экспериментальные установки для регистрации взрывного вскипания капелек жидкости на низко- и высокотемпературных центрах кипения, установки для исследования теплоотдачи к эмульсиям с низкокипящей дисперсной фазой.
2. Экспериментально в широком интервале температур и концентраций исследовать теплоотдачу к эмульсиям.
3. Разработать методику визуализации процесса пузырькового кипения эмульсий с применением скоростной видеосъемки.
4. Разработать модель пузырькового кипения эмульсий и получить расчетные соотношения для коэффициента теплоотдачи и плотности теплового потока.
5. Создать экспериментальные установки для визуализации структуры двухфазного потока и синхронного измерения пульсаций давления в потоке, температуры стенки и температуры исследуемой жидкости на входе и двухфазного потока на выходе из миниканала.

6. Экспериментально исследовать теплообмен при кипении эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой в миниканале. Визуализировать режимы течения двухфазного потока.

Научная новизна:

1. Исследовано взрывное вскипание перегретых капелек жидкости на низко- и высокотемпературных центрах кипения. Показано, что зависимость импульсов давления, возникающие при взрывном вскипании капелек перегретой жидкости, подчиняется закономерностям теории точечного взрыва. Экспериментально доказана возможность цепной активации низкотемпературных центров кипения, предложен механизм цепного зародышеобразования.
2. Впервые, экспериментально исследован теплообмен при кипении ряда теплоносителей, представляющих собой эмульсии с низкокипящей дисперсной фазой. Определены режимы теплообмена, при которых коэффициент теплоотдачи в 1.2 – 4 раза превышает значения, наблюдаемые в чистых жидкостях. Впервые с применением скоростной видеосъемки визуализирован процесс пузырькового кипения эмульсий. Предложены способы управления интенсивностью теплоотдачи при пузырьковом кипении эмульсий.
3. Предложена модель пузырькового кипения эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой. Получены расчетные формулы для определения коэффициента теплоотдачи и плотности теплового потока.
4. Получены новые экспериментальные данные о характеристиках теплообмена и режимах течения двухфазного потока при кипении эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой в миниканале круглого сечения с внутренним диаметром 1.1 мм. Исследован механизм возникновения неустойчивости двухфазного потока. Выявлены режимы течения двухфазного потока, при которых коэффициент теплоотдачи к эмульсиям н-пентан/вода и фреон-11/вода на 25 % выше, чем к воде. Показано, что при кипении только капелек дисперсной фазы эмульсии в широком диапазоне тепловых нагрузок отсутствует неустойчивость двухфазного потока.

Научная и практическая значимость. Полученные результаты развивают представления о механизме взрывного вскипания перегретых капелек жидкости на низкотемпературных центрах кипения. Предложен способ интенсификации теплообмена за счет кипения капелек низкокипящей жидкости, который позволяет увеличить коэффициент теплоотдачи и расширить температурный интервал высокоэффективного пузырькового кипения. Предложены способы управления числом центров кипения за счет введения в эмульсию различных добавок (ПАВ, активированный уголь, цеолиты и др.). Получены расчетные соотношения, позволяющие определить как плотность теплового потока, так и температурный напор при кипении эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой. Результаты исследований характеристик теплообмена и режимов течения двухфазного потока при

кипении эмульсий в миниканале могут быть использованы при проектировании компактных теплообменных устройств.

Методология и методы исследования. В работе использовались экспериментальные методы исследования теплообмена при кипении жидкостей; метод перегрева капелек одной жидкости в другой жидкой среде, нагрев электрическим током платиновой проволоки, внешней стенки трубы и миниканала. Для визуализации применялся микроскоп Альтами СМ II с увеличением до 200 крат и скоростная видеокамера Fasvideo-250 (до 5000 кадров в секунду). Экспериментальные данные обрабатывались методом наименьших квадратов и представлялись в виде критериальных уравнений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Взрывное вскипание перегретой капельки эмульсии на низкотемпературном центре кипения способствует активации нескольких соседних центров кипения. Движущей силой цепной активации центров кипения являются импульсы давления, возникающие при взрывном вскипании капелек.
2. Коэффициент теплоотдачи к эмульсии в 1.2 – 4 раза превышает значения, полученные для чистой дисперсионной среды. В кипящей эмульсии существенно расширяется температурный интервал пузырькового кипения, который в отдельных случаях превышает 150 °С. Вскипанию капелек дисперсной фазы эмульсии всегда предшествует ее перегрев выше температуры насыщенных паров жидкости, образующих дисперсную фазу.
3. Интенсивность теплоотдачи к эмульсии зависит от размера капелек дисперсной фазы и концентрации эмульсии. Путем введения в эмульсию адсорбентов можно управлять числом центров кипения, а, следовательно, интенсивностью теплоотдачи. Капельки дисперсной фазы эмульсии взрывообразно вскипают в тепловом пограничном слое, что приводит к изменению тепловой и гидродинамической обстановке у поверхности нагрева и к интенсивности теплоотдачи.
4. В рамках модели пузырькового кипения эмульсий получены уравнения для расчета коэффициента теплоотдачи с учетом влияния на интенсивность теплоотдачи дисперсионного состава эмульсии.
5. Кипение капелек дисперсной фазы эмульсии в миниканале увеличивает коэффициент теплоотдачи на 25 % по сравнению с дисперсионной средой. Нестабильность двухфазного потока проявляется при совместном кипении дисперсной фазы и дисперсионной среды.

Достоверность полученных данных подтверждается современными методами исследования, оценкой погрешностей экспериментов, сравнением полученных экспериментальных данных с результатами других исследований, использованием апробированных методик и средств измерения, воспроизводимостью экспериментальных данных. Научные положения и выводы подкреплены экспериментальными данными и теоретическими выкладками.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на Российских и Международных конференциях, симпозиумах, совещаниях и т.д.: 1 – 7 Российская национальная конференция по теплообмену, г. Москва, 1994, 1998, 2002, 2006, 2010, 2014, 2018 гг., Минский международный форум по тепло- и массообмену, г. Минск, 1996, 2004, 2012, 2016 гг., World Congress on Emulsions, Lyon, France, 2010, Школа-семинар под руководством академика А.И. Леонтьева, г. С.-Петербург, 2001 г., г. Рыбинск, 2003 г., г. Калуга, 2005 г., Международный симпозиум по энергетике, окружающей среде и экономике, г. Казань 1998 г., Внутрикамерные процессы в энергетических установках, акустика, диагностика, экология, г. Казань, 2001, 2008, 2009 гг., Метастабильные состояния и флуктуационные явления, г. Екатеринбург, 2007, 2017 гг., Современные проблемы термодинамики и теплофизики, г. Новосибирск, 2009 г., Сибирский теплофизический семинар, г. Новосибирск, 2014 г., Всероссийский семинар вузов по теплофизике и энергетике, г. Екатеринбург, 2013 г. Результаты, представленные в диссертации, включались в перечень важнейших достижений ИТФ УрО РАН (2013 и 2018 г.).

Личный вклад автора. Постановка задач исследований и подготовка основных публикаций проводилась автором как лично, так и совместно с д.ф.-м.н. Булановым Н.В. Автор принимал непосредственное участие в создании экспериментальных установок и проведении опытов, ему принадлежит основной вклад в обработку и интерпретацию результатов экспериментов. Основные научные результаты и выводы, включенные в диссертацию и выносимые на защиту, получены соискателем лично. В подготовке совместных публикаций по результатам исследований вклад диссертантом был определяющим.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 25 научных работах, включая 17 статей в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ и входящих в международные базы цитирования Scopus и WoS.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 224 страницы, включая 102 рисунка. Библиография включает 215 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** раскрывается актуальность, формулируется цель и основные задачи диссертационной работы, излагается научная новизна, фундаментальная и практическая значимость полученных результатов.

В **первой главе** представлены результаты исследования взрывного вскипания капелек жидкости на низко- и высокотемпературных центрах кипения. Высокотемпературные центры возникают в результате флуктуаций плотности перегретой жидкости, преимущественно около границы предельных перегревов жидкости. Все остальные центры кипения назовем низкотемпературными.

В п. 1.1 приводится определение перегретой жидкости, описываются методы захода в метастабильную область, методы экспериментального исследования достижимого перегрева жидкости, взрывное вскипания жидкости, паровой взрыв. В представленной работе изучались только мелкомасштабные паровые взрывы, в которых жидкость в перегретое состояние переводилась за счет ее нагрева при непосредственном контакте с другой жидкостью. Рассматривается случай, когда в качестве «взрывчатого» вещества выступают перегретые капельки жидкости, при вскипании которых реализуется явление парового взрыва. В этом случае для определения характеристик взрыва наибольшие трудности возникают при рассмотрении процесса перехода жидкости в перегретое состояние и, следующего за ним детонационного вскипания. Под детонационным вскипанием здесь принимается лавинообразное образование центров кипения в объеме перегретой жидкости.

В п. 1.2 описаны способы получения эмульсий, методы определения их дисперсионного состава и приводятся основные характеристики выбранных для исследования теплоносителей.

В п. 1.3 представлены результаты экспериментальных исследований взрывного вскипания малых объемов перегретой жидкости и определения основных характеристик парового взрыва.

Характер вскипания жидкости зависит от относительной величины перегрева ε , которая может быть представлена в виде $\varepsilon = (T - T_s)/(T_n - T_s)$, где T , T_s и T_n – температуры жидкости, ее насыщенных паров и предельного (достижимого) перегрева, соответственно. При малых перегревах ($\varepsilon \ll 1$) наблюдается «обычное» кипение на отдельных центрах. В этом случае в парожидкостную смесь превращается малая часть перегретой жидкости, непосредственно прилегающая к центрам кипения. При перегревах, близких к температуре предельного перегрева ($\varepsilon \approx 1$), вскипание носит взрывной характер, а в парожидкостную смесь превращается весь объем жидкости.

В динамике взрыва обычных взрывчатых веществ типа тротила и парового взрыва перегретых жидкостей имеются существенные различия. При взрыве «обычного» взрывчатого вещества практически нет верхнего ограничения на возникающее давление в центре взрыва, при паровом взрыве капелек перегретой жидкости давление в образующейся паровой полости не может превышать давление насыщенных паров жидкости при температуре ее вскипания. Кроме того, при взрыве «обычных» зарядов температура в центре взрыва всегда повышается, а при взрывном вскипании перегретой жидкости понижается. Поэтому возникают сомнения в правомерности прямого переноса результатов опытов с «обычными» взрывчатыми веществами на описание взрывного вскипания перегретой жидкости. Тем не менее, для средних и больших расстояний R можно воспользоваться теорией подобия для точечного взрыва, которая дает следующие зависимости для импульса давления M , передаваемого какому-либо телу с характерным линейным

размером L и максимального давления p_m , возникающего на фронте ударной волны:

$$p_m = f_1 \cdot E/R^3. \quad M = f_3 \cdot \left(\rho \cdot E/R \right)^{1/2} \cdot L^2.$$

Здесь E – энергия взрыва, R – расстояние от места взрыва до места наблюдения, ρ – плотность среды, в которой распространяется ударная волна, f_1 и f_3 – эмпирические константы.

Одним из свойств перегретой жидкости является частота зародышеобразования J – центров образования новой фазы в объеме перегретой жидкости. При определении величины J из опытов с маленькими капельками жидкости каждый раз получается, что чем меньше d , тем больше значение J . Это объясняется двумя возможными причинами – недогревом крупных капелек до расчетной температуры и их дополнительным вскипанием на поверхности капелек (на межфазной границе дисперсная фаза – дисперсионная среда). Для определения степени влияния недогрева капелек до температуры опыта на численное значение J были поставлены опыты с капельками жидкости разного диаметра. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Основным элементом экспериментальной установки является вертикально расположенный канал 1 из нержавеющей стали с внутренним диаметром 16 мм и длиной 1.5 м. Боковая поверхность канала имела три отверстия – одно около верхнего края канала, другие на расстоянии 100 и 150 мм от нижнего края канала. Нижний конец канала плотно закрыт пробкой с установленным в ней пьезокерамическим датчиком давления 2. Через нижнее боковое отверстие подавался нагретый теплоноситель (глицерин), через среднее - исследуемая эмульсия (н-пентан в глицерине) с заданным расходом. Отработанный теплоноситель и эмульсия отводились через верхнее отверстие.

При вскипании каждой капельки в окружающем ее теплоносителе возникал импульс давления, который регистрировался при помощи пьезокерамического датчика 2, блока формирования электрических импульсов 3 и их счетчика 4. Амплитуда импульсов, поступающих на счетчик 4, могла быть увеличена при помощи электронного усилителя в k раз.

Опыты проводились при температурах глицерина T_m как ниже, так и выше температуры предельного перегрева н-пентана T_n . При температуре теплоносителя T_m выше температуры предельного перегрева н-пентана T_n все капельки вскипали за время наблюдения $\tau_0 = 3.3$ с, что соответствовало времени их нахождения в канале. Температуру вскипающих капелек определяли по амплитуде генерируемых импульсов давления. Максимальная амплитуда соответствовала температуре предельного перегрева капелек.

Спонтанное образование центров кипения на поверхности S , ограничивающей перегретую жидкость, и в ее объеме V происходит независимо друг от друга. Величины J_V и J_S связаны с соответствующими

средними временами ожидания $\bar{\tau}_V$ и $\bar{\tau}_S$ объемных или поверхностных центров кипения соотношениями $J_V \cdot V \cdot \bar{\tau}_V = 1$ и $J_S \cdot S \cdot \bar{\tau}_S = 1$.

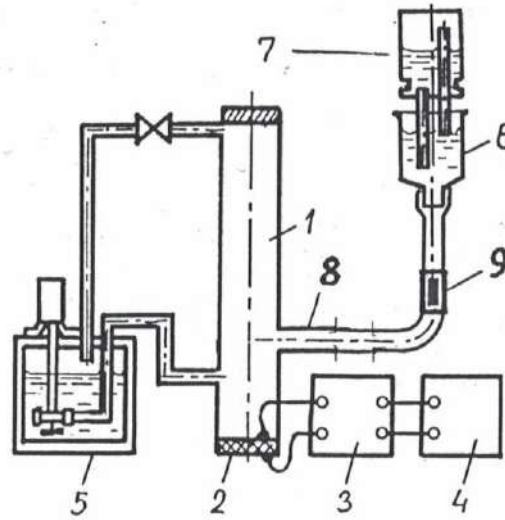


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения импульса давления, возникающего при взрывном вскипании капелек жидкости: 1 – измерительный канал; 2 – пьезокерамический датчик; 3 – блок формирования импульсов; 4 – счетчик импульсов; 5 – термостат с насосом и рабочим теплоносителем; 6, 7 – дозаторы эмульсии и балластной жидкости; 8 – капилляр для ввода эмульсии; 9 – ячейка для взятия пробы эмульсии.

Для экспериментального определения J_V и J_S проведены опыты с двумя сериями капелек, каждая из которых состояла из капелек с диаметрами либо d_1 , либо d_2 , а времена их пребывания в перегретом состоянии соответственно равны τ_1 и τ_2 . Для определения J_V и J_S было получено

$$J_V = \frac{6}{\pi(d_2 - d_1)} \left[\frac{\ln(1 - n_1/N_1)}{d_1^2 \tau_1} - \frac{\ln(1 - n_2/N_2)}{d_2^2 \tau_2} \right]; J_S = \frac{d_1 d_2}{\pi(d_1 - d_2)} \left[\frac{\ln(1 - n_1/N_1)}{d_1^3 \tau_1} - \frac{\ln(1 - n_2/N_2)}{d_2^3 \tau_2} \right],$$

где n_1, n_2 – число вскипевших капелек диаметром d_1 или d_2 , N_1, N_2 – общее число капелек с диаметрами d_1 или d_2 . На рис. 2 приведены результаты расчета частот зародышеобразования по формулам J_V и J_S .

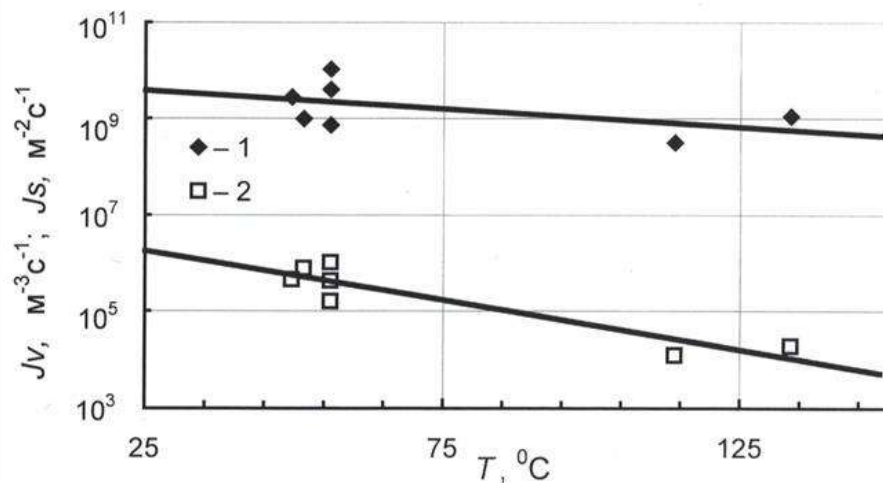


Рис. 2. Зависимость частоты зародышеобразования от температуры перегрева н-пентана: 1 – J_V ; 2 – J_S .

Также проведены опыты с добавкой в исследуемую жидкость поверхностно-активных веществ (ПАВ). Опыты с ПАВ показали, что во всех случаях их введение приводило к существенному снижению частоты зародышеобразования.

В п. 1.4 описывается экспериментальная установка, которая позволяет изучать явление цепной активации перегретых капелек эмульсии и определять условия, при которых такое явление возникает. В предлагаемой методике исследования задается число и размер перегреваемых капелек эмульсии, их объемная концентрация, а также регистрируется каждая вскипевшая капелька.

Основными частями экспериментальной установки (рис.3) являются дозаторы жидкостей 1, 5 и 7, генератор капелек 21, узел термостатирования эмульсии, канал 14 для перегрева капелек дисперсной фазы эмульсии и регистрации их вскипания, термостат 27 для нагрева и прокачивания теплоносителя через канал 14. Установка также содержит не показанные на рисунке источники электрического тока, измерительные приборы и другое вспомогательное оборудование. Капельки эмульсии формировались в генераторе 21 двумя способами. Под действием давления газообразного азота, находящегося в баллоне 3, исследуемая жидкость (вода) вытекала из мерного сосуда 1 через тонкое отверстие (сопло 23) на конце стеклянной трубки 26. Далее исследуемая жидкость, попадая в полость трубки 22 в виде тонкой струйки или цепочки пузырьков пара, течет по ней с заданным расходом. Диаметр d и число N_0 капелек, поступающих в канал 14 за 1 с, определяли с помощью оптического микроскопа.

В опытах определяли зависимость числа вскипающих капелек при вводе эмульсии через нижнее 18 или верхнее 16 отверстия от коэффициента усиления электрического сигнала k при заданной температуре теплоносителя T .

На рис. 4 показаны результаты обработки экспериментальных данных. Обращает на себя внимание тот факт, что в случае малоцентрированной эмульсии ($N_0 = 10.1 \text{ с}^{-1}$) функция $J(T)$ слабо изменяется, тогда как для относительно высокоцентрированной эмульсии ($N_0 = 63.0 \text{ с}^{-1}$) она резко возрастает при температуре $125 \text{ }^\circ\text{C}$. Мы предполагаем, что излом на графике зависимости $J = J(T)$ возникает тогда, когда расстояние между капельками оказывается малым и происходит цепное зародышеобразование.

Предложен следующий механизм цепного зародышеобразования. Вскипание жидкости происходит на так называемых готовых низкотемпературных центрах кипения. Эти центры представляют собой флокулы, состоящие из нескольких частиц коллоидного размера. Внутреннее пространство между частицами занято адсорбированным из исследуемой жидкости газом (воздухом), следы которого всегда присутствуют в любой жидкости как загрязняющее ее вещество. Если радиус поверхности газового пузыря, выступающего через промежутки между частицами, достигает радиуса критического зародыша, то флокула с таким количеством газа становится центром кипения.

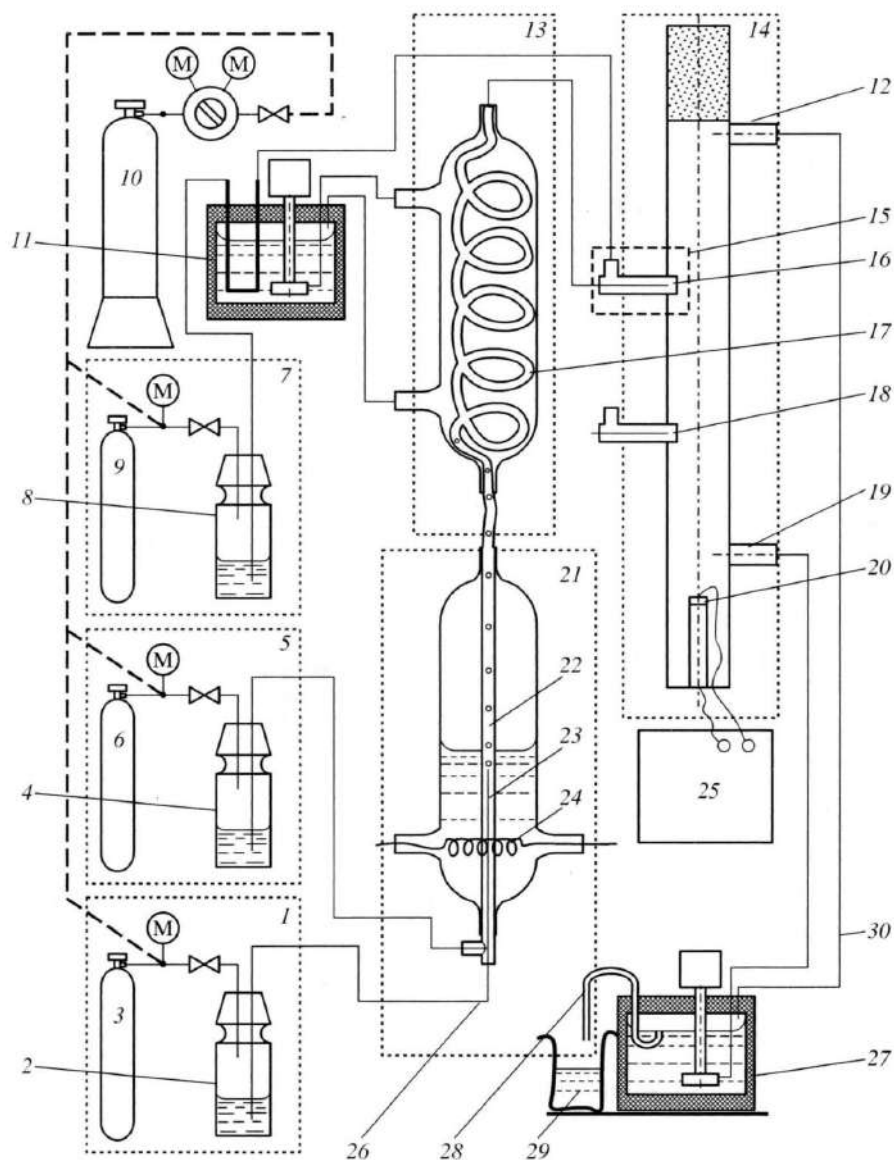


Рис. 3. Экспериментальная установка для определения плотности центров кипения: 1, 5 и 7 – дозаторы жидкости; 2, 4 и 8 – мерные сосуды; 3, 6, 9 и 10 – баллоны со сжатым газом; 11 – жидкостный термостат; 12, 19 – штуцеры для вывода и подачи теплоносителя в измерительный канал; 13 – узел термостатирования эмульсии; 14 – измерительный канал; 15 – смеситель; 16, 18 – место ввода эмульсии в канал; 17 – стеклянный змеевик для термостатирования эмульсии; 20 – датчик регистрации импульсов давления; 21 – генератор капелек; 22, 26 – коаксиально расположенные трубки; 23 – сопло; 24 – электрический нагреватель; 25 – электронная система для регистрации электрических импульсов; 27 – термостат с дисперсионной средой исследуемой эмульсии; 28 – трубка для слива излишков дисперсионной среды эмульсии; 29 – мерный сосуд; 30 – трубка для возврата эмульсии в термостат.

Некоторые флокулы могут стать центрами кипения раньше, когда адсорбированный и удерживаемый флокулой газ освобождается от окружающих его частиц и становится центром кипения. Это может произойти, например, под действием механических сил разрушающих

флокулу. Такими силами могут быть силы ударной волны или волны разрежения, возникающие при вскипании жидкости на любом близкорасположенном соседнем, уже активированном, центре. Как известно, сила ударной волны тем больше, чем больше объем вскипающей капельки, чем больше перегрев и чем она ближе расположена к новому потенциально возможному центру кипения (флокуле). Поэтому, чем больше концентрация N_0 , тем вероятнее активация нового центра кипения и вскипание новой капельки. Вскипание капельки может привести к активации дополнительных капелек, и этот процесс может продолжаться продолжительное время, то есть возникает цепной (лавинообразный) процесс активации центров кипения, что и ведет к излому кривой $J = J(T)$ (рис.4).

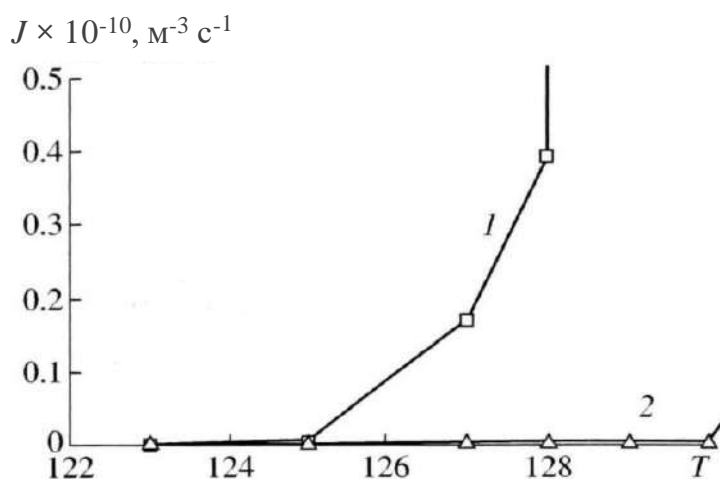


Рис. 4. Зависимость частоты зародышеобразования J в капельках перегретой воды от температуры: 1 – $N_0 = 63 \text{ c}^{-1}$; 2 – 10 c^{-1} .

В п. 1.5 получена зависимость критического объема V_c от плотности центров кипения j при постоянной концентрации дисперсной фазы эмульсии. Критический объем эмульсии V_c это такой объем эмульсии, при превышении которого вскипание любой капельки дисперсной фазы приводит к вскипанию соседних капелек и к дальнейшему лавинообразному вскипанию капелек по всему объему рассматриваемой перегретой части дисперсной фазы эмульсии.

Во **второй главе** приведены результаты экспериментального исследования теплообмена при кипении эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой на поверхности проволочных нагревателей и в трубе с внутренним диаметром 16 мм.

В п. 2.1 приведен обзор литературы по теплообмену при кипении эмульсий. На основании анализа литературных данных были определены цели и задачи исследования, методы экспериментального исследования, выбраны типы жидкостей образующих эмульсии.

В п. 2.2 приведены описание экспериментальных установок и методик измерения коэффициента теплоотдачи.

Для исследования теплообмена в эмульсиях при атмосферном давлении создана экспериментальная установка (рис.5), в которой теплоотдающей поверхностью является тонкая платиновая проволока 3. Использование

платиновой проволоки позволяет одновременно с высокой точностью определять как мощность, снимаемую с ее поверхности, так и ее температуру. Коэффициент теплоотдачи α рассчитывался по формуле

$$\alpha = \frac{UI}{\pi LD(T_w - T_0)},$$

где U – падение напряжения на проволоке при прохождении через нее электрического тока I ; L и D – длина и диаметр проволоки; T_w и T_0 – температура проволоки и теплоносителя (эмульсии) вне теплового пограничного слоя.

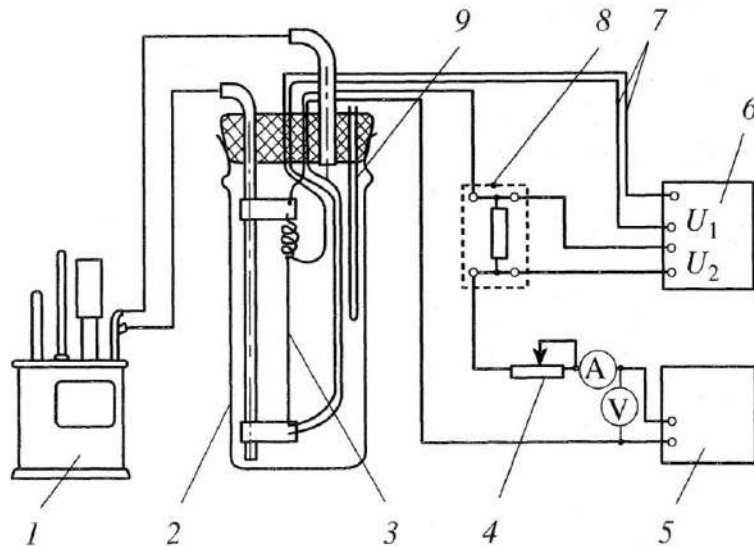


Рис. 5. Схема экспериментальной установки для измерения коэффициентов теплоотдачи от проволочных нагревателей при атмосферном давлении: 1 – термостат; 2 – стеклянная ячейка; 3 – платиновая проволока; 4 – магазин сопротивлений P314; 5 – источник постоянного тока; 6 – цифровые вольтметры Ц300; 7 – потенциальные выводы от проволоки нагревателя; 8 – образцовая катушка сопротивления P321; 9 – чехол для термопары.

Основные сложности визуализации процесса кипения эмульсий связаны с их непрозрачностью. Исследуемые эмульсии помещались в плоскопараллельный стакан со сторонами 30x50 мм и высотой 120 мм. В качестве нагревателя использовалась платиновая проволока диаметром 0.10 мм и длиной около 25 мм. Наблюдение за поверхностью нагреваемой проволоки велось с помощью цифрового стереомикроскопа совмещенного со скоростной камерой марки Fasvideo-250 (до 5000 кадров в секунду).

В экспериментальной установке по определению коэффициента теплоотдачи от внутренней поверхности трубы к теплоносителю использована труба с внутренним диаметром $d = 16$ мм, толщиной стенки $\delta x = 2$ мм и длиной обогреваемого участка $L = 300$ мм. Обогрев измерительного участка осуществлялся при помощи нихромового проволочного нагревателя, диаметром 0.8 мм, намотанного на трубку поверх электрической изоляции из листовой слюды. Температура стенки трубы измерялась восемью медь-константановыми термопарами, припаянными по четыре штуки в ряд. Через

измерительную трубу при помощи центробежного насоса прокачивался исследуемый теплоноситель с заданным массовым расходом. Коэффициент теплоотдачи вычисляли по формуле

$$\alpha = \frac{W - W_0}{\Delta T \pi L D},$$

где $W = UI$, U и I – мощность, напряжение и ток на электронагревателе; W_0 – потери тепла через теплоизоляцию; $\Delta T = \overline{T_w} - \overline{T}$ – средний температурный напор между внутренней поверхностью измерительной трубы и теплоносителя в ядре потока; L и d – длина и внутренний диаметр обогреваемого участка.

Экспериментальная установка для исследования теплоотдачи к эмульсиям при давлениях выше атмосферного состояла из рабочей камеры, системы создания и регулирования давления и измерительной части. В качестве нагревателя использовалась платиновая проволока диаметром 0.050 мм и длиной 36 мм. Перед началом каждой серии опытов рабочую камеру откачивали форвакуумным насосом до остаточного давления $\sim 10^{-2}$ мм рт. ст. Затем исследуемый теплоноситель подавался в камеру. Система создания и регулирования давления включала термокомпрессор, с помощью которого в рабочей камере создавалось требуемое давление.

В п. 2.3 представлены результаты экспериментального исследования теплообмена при кипении эмульсий. В опытах вскипанию капелек дисперсной фазы всегда предшествует перегрев выше температуры насыщенных паров жидкости образующих дисперсную фазу. Явление перегрева эмульсии на теплоотдающей поверхности мы называем задержкой начала кипения. Для всех исследованных эмульсий величины перегрева $\Delta T_{зад} = T_w - T_s$ капелек дисперсной фазы составляли от 20 до 150 °С, в зависимости от дисперсионного состава, концентрации и размера капелек дисперсной фазы эмульсии. Теплообмен при задержке кипения осуществляется за счет теплопроводности и конвекции в слое перегретой эмульсии. Конвективный теплообмен в этом случае является неустойчивым, так как жидкость в метастабильном состоянии не может находиться бесконечно долго. Рано или поздно на теплоотдающей поверхности или в перегретом слое жидкости активировались центры кипения и капельки вскипали.

На примере кипения двух эмульсий на рис. 6 представлены температурные и концентрационные зависимости коэффициента теплоотдачи. На рис. 6(а) показана зависимость коэффициента теплоотдачи α от вертикально расположенной платиновой проволоки диаметром 0.1 мм к чистой кремнийорганической жидкости ПМС-300 и к эмульсии вода/ПМС-300. При концентрации эмульсии 0.10 об. % вскипание дисперсной фазы эмульсии происходит при температуре нагревателя 182 °С, задержка начала кипения $\Delta T_{зад} = T_w - T_s$ составляет 82 °С. С увеличением концентрации эмульсии величина задержки начала кипения снижается, а при концентрациях от 4.0 до 8.0 об. % наблюдается слабое различие в $\Delta T_{зад}$.

Максимальное значение α достигало при температурах проволоки близких к $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ и составляет $\alpha_{max} = 2.8\text{ кВт}/(\text{м}^2\text{ }^{\circ}\text{C})$ при концентрациях воды от 2 до 8 об. %.

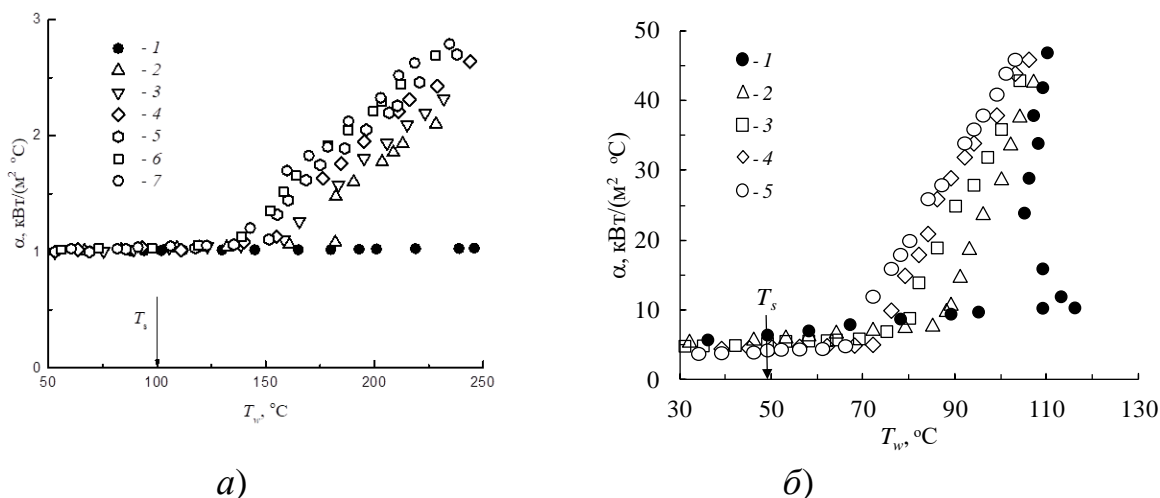


Рис.6. Зависимость коэффициента теплоотдачи α от температуры нагрева T_w при теплообмене от платиновых проволок к чистым жидкостям и к эмульсиям. T_s – температура нормального кипения дисперсной фазы: а) – эмульсия вода/ПМС-300; 1 – чистая ПМС-300; 2 – 7 – эмульсии вода/ ПМС-300 при концентрациях C воды, соответственно равных 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 и 8.0 об.%; б) – эмульсия фреон-113/вода; 1 – вода; 2 – 5 – эмульсии фреон-113/вода с концентрацией 0.5, 1.0, 3.0 и 5.0 об. %, соответственно.

На рис. 6(б) приведены результаты измерения коэффициента теплоотдачи α в зависимости от температуры нагреваемой платиновой проволоки T_w для воды и эмульсии фреон-113/вода. Температура кипения фреона-113 $T_s = 47.6\text{ }^{\circ}\text{C}$. При конвективном теплообмене наблюдается снижения коэффициента теплоотдачи к эмульсии фреон-113/вода. Это вызвано тем, что плотность фреона-113 ($\rho = 1510\text{ кг}/\text{м}^3$) больше чем плотность воды ($\rho = 958\text{ кг}/\text{м}^3$), из-за чего капельки фреона в эмульсии способны оседать на поверхности нагрева. Так как теплопроводность фреона-113 ниже чем у воды, то это приводит к снижению коэффициента теплоотдачи. С ростом концентрации эмульсии число капелек осевших на поверхности нагрева увеличивается, в результате чего наблюдается дальнейшее ухудшение конвективного теплообмене. В эмульсии с концентрацией 0.5 об. % кипение начинается при температуре нагревателя выше $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ и наблюдается заметное увеличение коэффициента теплоотдачи α по сравнению с значениями α , полученными для чистой воды. При увеличении концентрации эмульсии до 5.0 об. % температура начала кипения эмульсии снижается до $65\text{ }^{\circ}\text{C}$. Кипение дисперсной фазы эмульсии происходит вплоть до температуры нагревателя равной температуре кипения воды, затем в пузырьковом кипении участвуют совместно капельки фреона-113 и воды.

Как показано на рис. 6, в пузырьковом режиме кипения эмульсий может участвовать только дисперсная фаза, а так же совместно дисперсная фаза и дисперсионная среда. При совместном кипении вначале в кипении участвуют капельки дисперсной фазы эмульсии, а затем, при достижении температуры кипения дисперсионной среды, в режиме пузырькового кипения и кризисе кипения участвует дисперсная фаза совместно с дисперсионной средой. Еще один механизм перехода от кипения капелек дисперсной фазы к совместному кипению дисперсной фазы и дисперсионной среды обнаружен в эмульсиях вода/ПЭС-4 и вода/ПМС-20 (рис.7).

Кипение эмульсии вода/ПМС-20 и вода/ПЭС-4 начинается при температурах проволоки выше температуры кипения воды $T_s = 100\text{ }^\circ\text{C}$ на 66 и 80 $^\circ\text{C}$ соответственно. В опытах наблюдается резкий рост α , участок AB и ac рис. 7, на котором происходит кипение только капелек дисперсной фазы эмульсии. При дальнейшем увеличении температуры проволоки на участке BC и cd наблюдается спад значений α . Температурный интервал такого спада составляет около 100 $^\circ\text{C}$. Уменьшение значений α заканчивается при температурах нагреваемой проволоки равной температуре кипения дисперсионной среды. При дальнейшем увеличении температуры проволоки, участок CD и de , в пузырьковом кипении участвует дисперсная фаза совместно с дисперсионной средой.

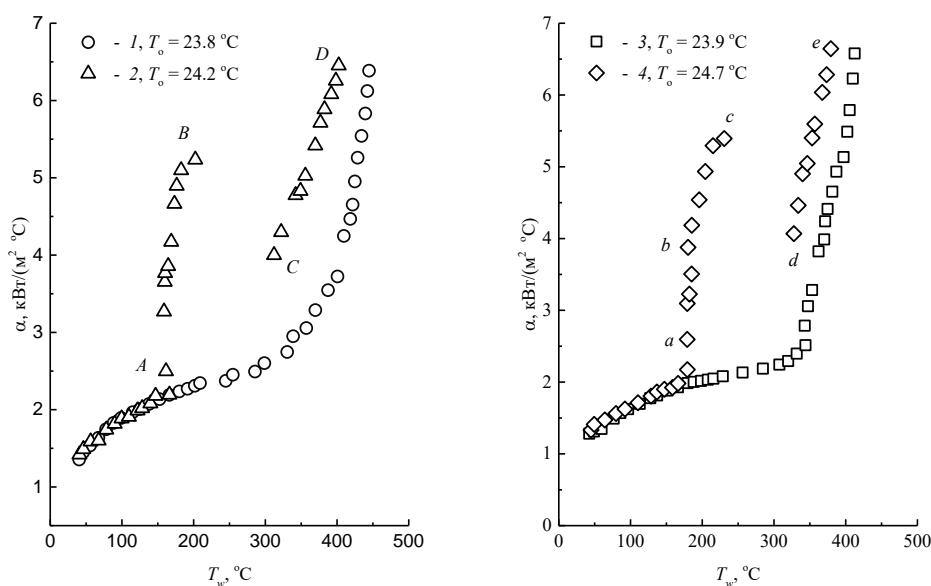


Рис. 7. Экспериментальные данные при кипении различных жидкостей на поверхности горизонтальной платиновой проволоки. T_0 – температура жидкости вдали от нагревателя: 1 – полиметилсилоксан ПМС-20; 2 – эмульсия вода/ПМС-20 с концентрацией $C = 0.50$ об. %; 3 – полиэтиленсилоксан ПЭС-4; 4 – эмульсия вода/ПЭС-4, $C = 0.30$ об. %.

Наблюдения за поверхностью нагреваемой проволоки показали разные механизмы парообразования при кипении эмульсии. Парообразование при кипении только капелек дисперсной фазы не отличается от парообразования при кипении сильно недогретых до температуры кипения чистых жидкостей, когда образующиеся паровые пузыри не отрываются от поверхности нагрева.

В эмульсии капельки дисперсной фазы вскипают на поверхности проволоки. С ростом плотности теплового потока, количество вскипающих капелек увеличивается. Образующиеся паровые пузыри объединяются в крупные стационарные пузыри «сидящие» на поверхности проволоки, размеры которых достигают 900 – 1000 мкм. Отвод тепла от нагреваемой проволоки крупными паровыми пузырями следующий: в основании парового пузыря происходит испарение жидкости, перенос пара к вершине пузырька, конденсация на относительно более холодной верхней части пузырька. Такое испарение и конденсация может продолжаться достаточно продолжительное время.

В точке *B* и *c* рис. 7 крупные паровые пузыри, образованные при кипении дисперсной фазы эмульсии, достигают критических размеров и покидают поверхность нагрева, место которых занимает новая порция эмульсии. Вновь вскипающие капельки дисперсной фазы образуют паровые пузыри диаметром 80 – 120 мкм, которые вытесняются с поверхности нагрева конвективными потоками нагретой дисперсионной среды. Паровые пузыри при этом теряют прямой контакт с поверхностью нагрева и становятся неустойчивыми. Под действием термокапиллярной конвекции они скользят по поверхности проволоки, смоченной высококипящей дисперсной средой.

По динамике протекания процесса переход из точки *B* в точку *C* и из точки *c* в *d* (рис. 7) похож на переход от пузырькового режима кипения к пленочному кипению однородных жидкостей, когда малое увеличение мощности нагрева в окрестности критической плотности теплового потока приводит к резкому образованию сплошной пленки пара. В наших опытах незначительное увеличение мощности нагрева проволоки в точках *B* и *c* (рис. 7) приводит к мгновенному росту температуры проволоки до температуры кипения дисперсионной среды и падению значений коэффициента теплоотдачи. Обычно кризис кипения жидкостей в значительной степени определяется гидродинамическими эффектами вызванными ухудшением условий поступления жидкости к поверхности нагрева из-за встречного потока пара. При переходе от кипения дисперсной фазы эмульсии к совместному кипению с дисперсионной средой нами не наблюдалось сочетание неустойчивого пузырькового и пленочного кипения. Наличие неустойчивого пленочного кипения невозможно, так как поверхность проволоки смочена высококипящей дисперсионной средой препятствующей образованию сухих пятен. Переходный режим кипения в эмульсиях связан с неустойчивостью паровых пузырей и наличием пленки жидкости между пузырьками пара и поверхностью нагрева, роль которую играет высококипящая дисперсионная среда.

Для определения степени влияния размеров капелек на интенсивность теплоотдачи проведены исследования с мелко- и крупнодисперсными эмульсиями рис. 8. Опыты поставлены на горизонтально расположенной платиновой проволоке длиной 50 мм и диаметром 0,1 мм и при вынужденном течении эмульсии в трубе с внутренним диаметром 16 мм. Исследования

проведены с эмульсией вода/вакуумное масло ВМ-1С. Крупнодисперсная эмульсия, со средним диаметром капелек дисперсной фазы 20 - 30 мкм, готовилась механическим дроблением пропеллерной мешалкой, а мелкодисперсная, со средним диаметром капелек дисперсной фазы 1 – 2 мкм, в ультразвуковом поле с частотой 22 КГц. Процесс пузырькового кипения эмульсии на поверхности платиновой проволоки визуализировался при помощи микросъемки.

В проведенных исследованиях установлено, что мелкодисперсная эмульсия вскипает при более высоких температурах, чем крупнодисперсная. При слабо развитом кипении, когда вскипают одиночные капельки дисперсной фазы на центрах кипения расположенных на поверхности нагрева, объем образующегося пара у крупнодисперсной эмульсии больше, чем у мелкодисперсной эмульсии. При интенсивном кипении вместе с большими прилипшими пузырьками пара наблюдается взрывное вскипание перегретых капелек дисперсной фазы между ними. Исследования также показали, что особенности теплообмена (задержка начала кипения, высокие значения коэффициента теплоотдачи, широкий интервал пузырькового кипения), которые наблюдаются при кипении на тонких проволоках, проявляются и при теплообмене в трубе. Как и при кипении на проволочном нагревателе, так и при кипении в трубе размер капелек дисперсной фазы оказывает влияние на величину плотности теплового потока.

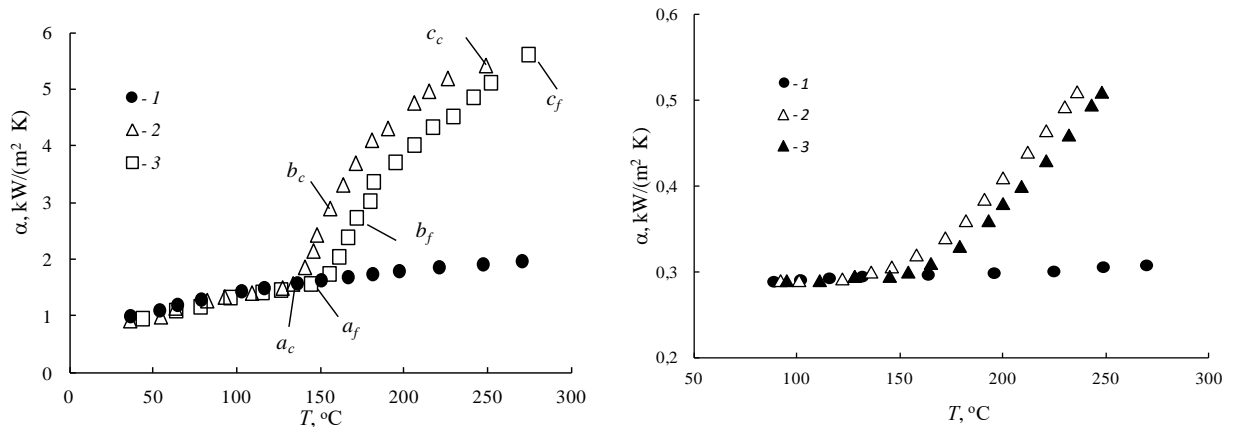


Рис. 8. Влияние размера капелек дисперсной фазы эмульсии на интенсивность теплоотдачи, концентрация эмульсии $C = 1.0$ об. %: а) горизонтальная проволока, 1 – масло ВМ-1С; 2 – крупнодисперсная эмульсия вода/масло ВМ-1С; 3 – мелкодисперсная, $T_o = 26.0$ °С; б) труба, 1 – масло ВМ-1С; 2 – крупнодисперсная эмульсия вода/масло ВМ-1С; 3 – мелкодисперсная, $T_o = 60.0$ °С, расход теплоносителя $G = 2.5 \cdot 10^{-6}$ м³/с.

Кризис кипения эмульсии вода/масло ВМ-1С образуется при температурах ниже температуры кипения масла ВМ-1С. Из этого следует, что на поверхности нагрева образуется пленка пара, состоящая только из пара воды. В опытах на проволочном нагревателе получено, что чем больше размер капельки дисперсной фазы эмульсии, тем ниже значения критической плотности теплового потока. Это связано с тем, что объем пленки пара, способного обволакивать проволочный нагреватель, что вызывает ухудшение

локального теплообмена и пережог проволоки, в крупнодисперсной эмульсии образуется при меньших плотностях теплового потока по сравнению с мелкодисперсной эмульсией.

В экспериментах с водой и эмульсиями н-пентан/вода и н-пентан/глицерин проведена визуализация процесса кипения с применением скоростной видеосъемки. В опытах при кипении дистиллированной воды наблюдается испускание с поверхности нагрева микропузырьков пара, т.н. эмиссия микропузырьков. Эмиссия микропузырьков наблюдается в условиях сильного переохлаждения жидкости и сопровождается коллапсом пузырьков пара. На кривой кипения эмульсии н-пентан/вода, как и при кипении эмульсии фреон-113/вода (б(б)), можно выделить два участка пузырькового кипения. На одном участке, при температурах проволоки ниже температуры насыщенных паров воды T_s , происходит кипение только капелек н-пентана. На другом участке, при температурах проволоки выше T_s воды, наблюдается совместное кипение капелек н-пентана и воды. При кипении только капелек н-пентана, в зависимости от их диаметра, образуются паровые пузыри малых размеров, которые соединяются в крупные пузыри диаметрами 600 - 1100 мкм. Крупные паровые пузыри могут объединяться и всплывать. Интенсивные процессы парообразования наблюдаются при температурах нагреваемой проволоки выше температуры насыщенных паров воды T_s . С началом кипения воды включается механизм микропузырькового кипения. Вокруг нагреваемой проволоки образуется мелкодисперсное облако из микропузырьков неконденсирующегося газа, которое препятствует наблюдению за капельками н-пентана в тепловом пограничном слое.

На рис. 9. показана зависимость коэффициента теплоотдачи α от температуры нагревателя T_w при конвективном теплообмене и пузырьковом кипении глицерина и эмульсии н-пентан/глицерин. Исследования проведены при концентрациях эмульсии 0.10 и 0.50 об.%. Из рисунка видно, что вскипание капелек н-пентана происходит при температуре проволочного нагревателя выше температуры предельного (достижимого) перегрева T_{nn} , которая для н-пентана равна 146 °С. Перегрев при концентрации эмульсии 0.10 об. % равен $\Delta T_{зад} = 168.5 - 36.1 = 132.4$ °С, а при концентрации 0.50 об. % $\Delta T_{зад} = 117.7$ °С. Более высокие перегревы при малых концентрациях эмульсии связаны с относительно малым количеством капелек н-пентана, находящихся в прямом контакте с нагреваемой проволокой.

При кипении эмульсии н-пентан/глицерин основной вклад в плотность теплового потока вносят кипящие капельки н-пентана. Визуализация процесса пузырькового кипения эмульсии н-пентан/глицерин показала, что парообразование происходит по следующим сценариям: кипение отдельных капелек дисперсной фазы на поверхности проволоки с коалесценцией в крупные паровые пузыри; взрывное вскипание капелек н-пентана при контакте с нагретой поверхностью проволоки выше температуры T_{nn} предельного перегрева н-пентана и взрывное вскипание перегретых капелек н-пентана в тепловом пограничном. При взрывном вскипании капельки н-

пентана, за короткое время $\tau = 0.3$ мс образуется паровой пузырь (рис. 10), диаметр которого больше диаметра крупных пузырей, образованных в результате коалесценции пузырьков при кипении отдельных капелек дисперсной фазы. На рис. 10 стрелкой показана капелька н-пентана диаметром 95 мкм, находящаяся на расстоянии 240 мкм от поверхности проволоки. Цифрами 1 и 2 отмечены крупные паровые пузыри «сидящие» на поверхности нагрева. При взрывном вскипании капельки н-пентана, объем образующегося парового пузыря нарастает с такой скоростью, что растущий паровой пузырь «раздвигает» эмульсию, которая накатываясь на крупные пузыри 1 и 2 деформирует их, и они покидают поверхность нагрева. Покидающие поверхность нагрева пузыри 1 и 2 увлекают за собой нагретый пристеночный слой эмульсии, место которой занимает новая порция эмульсии. Такой механизм кипения вносит дополнительный вклад в интенсивность теплоотдачи и расширяет температурный интервал пузырькового кипения эмульсии.

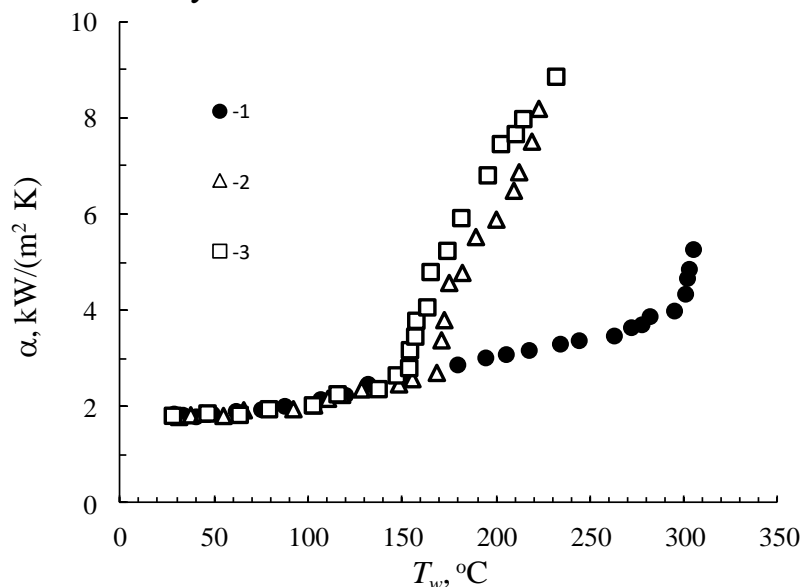


Рис. 9. Зависимость коэффициента теплоотдачи α от температуры нагревателя T_w при конвективном теплообмене и пузырьковом кипении на горизонтальной платиновой проволоке: 1 – глицерин, $T_o = 22.3^\circ\text{C}$; 2 – эмульсия н-пентан/глицерин, $T_o = 22.9^\circ\text{C}$, $C = 0.10$ об. %; 3– эмульсия н-пентан/глицерин, $T_o = 22.4^\circ\text{C}$, $C = 0.50$ об. %.

Интенсивностью теплоотдачи при кипении эмульсий можно управлять, как это было показано ранее, путем изменения среднего размера капелек дисперсной фазы (рис.8). Были проведены исследования по влиянию на процесс кипения эмульсии различных добавок в виде адсорбентов, поверхностно-активных веществ, наночастиц и др. Для увеличения интенсивности кипения эмульсий необходимо искусственно создать дополнительные центры кипения в объеме капелек дисперсной фазы. С этой целью проведены исследования при вводе в эмульсию активированного угля, в виде порошка с размерами частиц 1-30 мкм, цеолита NaX и наночастиц диоксида кремния SiO_2 .

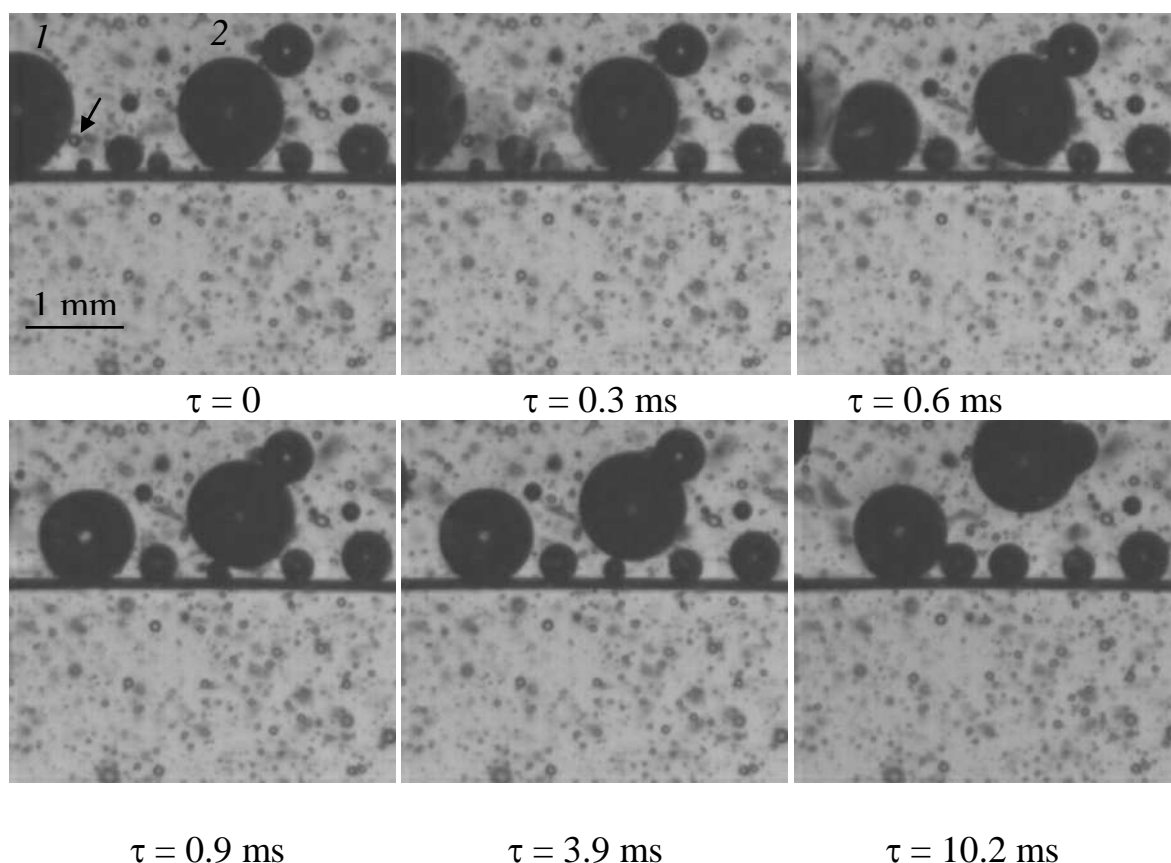


Рис. 10. Взрывное вскипание капельки н-пентана в тепловом пограничном слое. Стрелкой отмечена перегретая капелька н-пентана. $C = 0.5$ об.%; $T_w = 232.0$ °С; $q = 1.87$ МВт/м².

Известно, что активированный уголь адсорбирует газ. Масса адсорбированного газа уменьшается с ростом температуры. Предполагается, что в тепловом пограничном слое частицы активированного угля будут выделять газовые пузырьки и образовывать новые центры кипения. В опытах с эмульсией вода/ПЭС-5 (рис. 11) при вводе в нее активированного угля значение коэффициента теплоотдачи возрастает (при температурных напорах $\Delta T = 100 - 130$ °С), а задержка начала кипения снижается на 10 °С.

Уменьшение задержки начала кипения происходит, несмотря на тот факт, что при перемешивании эмульсии с углем его твердые частицы способствуют дроблению крупных капелек дисперсной фазы эмульсии на более мелкие. Тем не менее, способность активированного угля выделять при нагреве адсорбированный в нем газ приводит к снижению задержки начала кипения.

Если добавление активированного угля в эмульсию вода/масло приводит к уменьшению величины задержки начала кипения, то добавки угля в эмульсию н-пентан/глицерин приводят к противоположному эффекту. Такое поведение обусловлено тем, что адсорбционные связи активированного угля с органическими жидкостями оказываются более сильными, чем с компонентами атмосферного воздуха. Уголь прочно связывает газ только в своих мелких порах, в которые не могут войти

крупные молекулы органических жидкостей, а крупные поры и внешняя поверхность частиц покрывается органическими жидкостями, адсорбированные газы с них полностью вытесняются. Это приводит к тому, что число активируемых центров и интенсивность кипения уменьшаются, а величина задержки кипения возрастает.

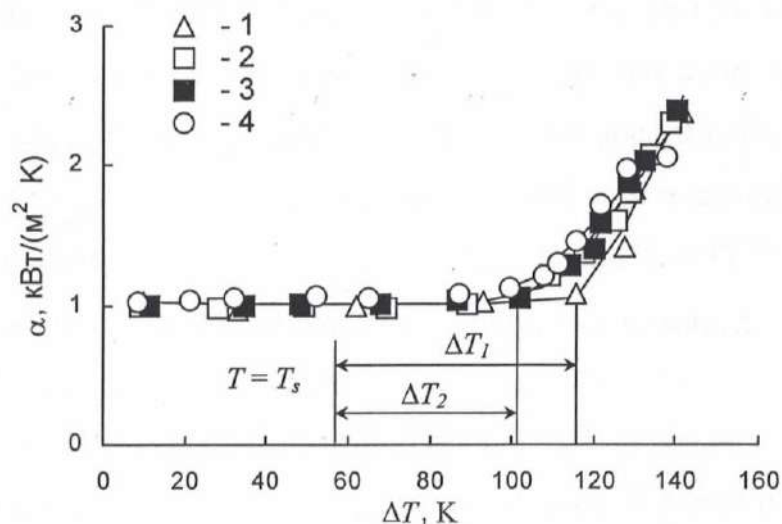


Рис. 11. Влияние добавки активированного угля на величину задержки начала кипения для эмульсии вода/ПЭС-5 при атмосферном давлении. Вертикальная платиновая проволока диаметром 0.1 мм и длиной 50 мм. $T_o = 23 \text{ }^\circ\text{C}$: 1 – эмульсия без добавок активированного угля; 2, 3, 4 – эмульсия с добавками 0.045, 0.090 и 0.30 вес. % активированного угля. Концентрация эмульсии $C = 4.0$ об. %.

Опыты при введении наночастиц в дисперсную фазу эмульсии вода/вакуумное масло ВМ-1С показали, что добавки наночастиц в дисперсную фазу эмульсии, практически не влияют на характеристики теплообмена, по сравнению с эмульсией без их добавок. Увеличение массовой концентрации наночастиц (до 0.3 вес. %) в воде так же не влияет на теплообмен.

Увеличение задержки начала кипения можно ожидать и при добавке в эмульсию цеолитов, так как эти адсорбенты хорошо поглощают жидкости. Зависимость коэффициента теплоотдачи α от температуры T_w нагреваемой проволоки для эмульсии вода/ПЭС-4 при введении в эмульсию цеолита NaX показано на рис. 12. Из рисунка видно, что с ростом массовой концентрации цеолита NaX в эмульсии происходит увеличение задержки начала кипения эмульсии, что вызвано поглощением частицами цеолита части капелек дисперсной фазы эмульсии.

Были проведены опыты с добавками в эмульсии поверхностно-активных веществ, тринатрийфосфата и едкого натра. Добавки ПАВ в эмульсию снижают межфазное натяжение на границе дисперсная фаза - дисперсионная среда, придают эмульсии устойчивость, и препятствуют коагуляции и коалесценции капелек дисперсной фазы. Зависимость коэффициента теплоотдачи от температурного напора для эмульсии вода/ПЭС-5 при введении в дисперсную фазу эмульсии 1.0 вес. % едкого

натра и тринатрийфосфата показана на рис. 13. Как видно из рисунка, добавки ПАВ к эмульсиям приводят к дополнительной задержке начала кипения при малых концентрациях эмульсии. С увеличением концентрации эмульсии влияние ПАВ на величину задержки начала кипения ослабевает. При вводе в эмульсию тринатрийфосфата наблюдалась большая задержка начала кипения, чем при работе с такими же эмульсиями, но с добавками едкого натра. Однако значения коэффициента теплоотдачи, при одинаковых температурных напорах, для эмульсии с едким натром оказались выше, чем с тринатрийфосфатом.

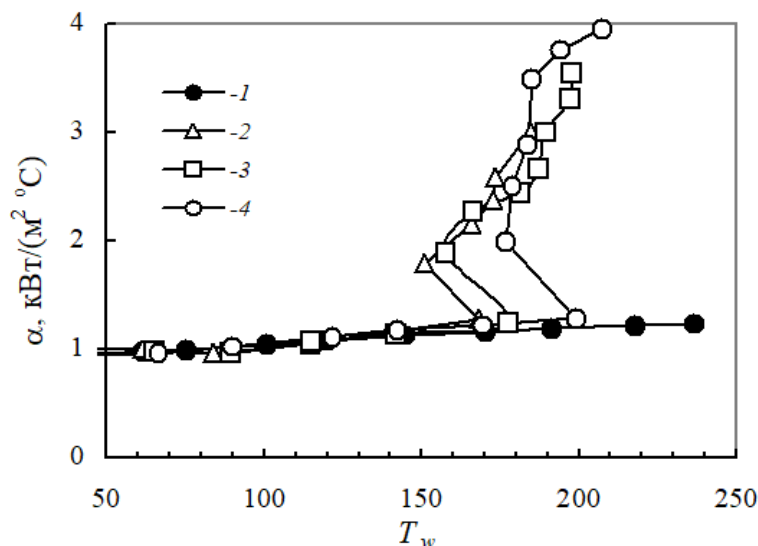


Рис. 12. Влияние добавок цеолита NaX на интенсивность теплоотдачи и величину задержки начала кипения эмульсии вода/ПЭС-4, $C = 1.0$ об. %, $T_0 = 25$ °C: 1 – чистая ПЭС-4; 2 – эмульсия без добавок цеолита; 3, 4 эмульсия с добавками 0.6 и 2.0 мас.% цеолита.

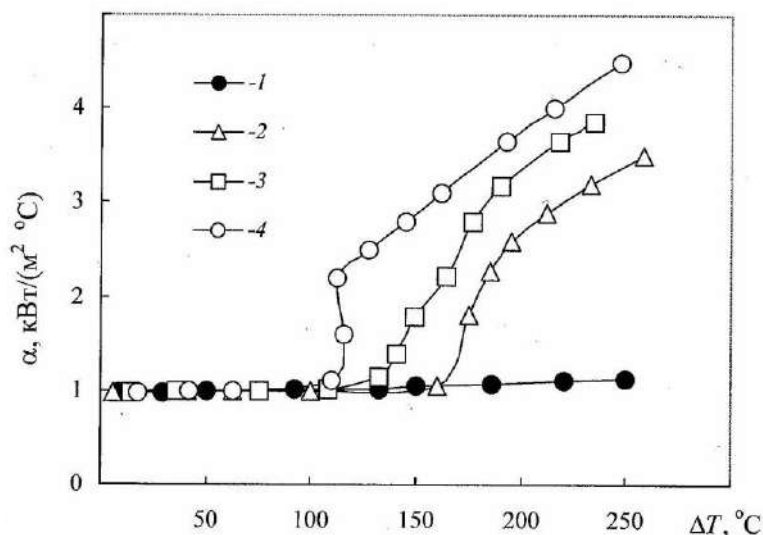


Рис. 13. Влияние добавок ПАВ в эмульсию вода/ПЭС-5 на интенсивность теплоотдачи и величину задержки начала кипения. $T_0 = 35$ °C, $C = 1.0$ об. %: 1 – чистая ПЭС-5; 2 – эмульсия вода/ПЭС-5 с добавкой 1.0 вес. % триангийфосфата; 3 – с добавкой 1.0 вес.% едкого натра; 4 – эмульсия вода/ПЭС-5 без добавок ПАВ.

Поставлены опыты по теплоотдаче к эмульсии вода/масло VM-1С, в которую добавляли полиэтиленгликоль (полимер этиленгликоля) ПЭГ 400. Добавки полиэтиленгликоля ПЭГ-400 в эмульсию приводят к снижению величины задержки начала кипения и увеличению коэффициента теплоотдачи по сравнению с эмульсией без добавки ПЭГ-400. Можно предположить, что уменьшение задержки начала кипения связано с малой растворимостью ПЭГ-400. В результате в тепловом пограничном слое образуются частицы ПЭГ-400, которые служат дополнительными центрами кипения.

Теплоноситель диэтиловый эфир/вода представляет собой 6.0 вес.% раствор диэтилового эфира в воде. Особенность теплоносителя состоит в том, что при комнатной температуре он представляет собой однородный раствор, а при нагреве выше 30 °С раствор вначале превращается в тонкодисперсную эмульсию, а затем расслаивается на две фазы. При работе с теплоносителем диэтиловый эфир + вода, так же как и для ранее описанных эмульсий, расширяется температурный интервал пузырькового кипения и, как следствие, достигается большая плотность теплового потока до наступления кризиса пузырькового кипения. Такое поведение рассматриваемой системы диэтиловый эфир + вода принципиально отличает ее от не расслаивающихся смесей. На рис. 14 показана барическая зависимость коэффициента теплоотдачи α от платиновой проволоки диаметром 0.050 мм к воде и к водному раствору диэтилового эфира. Из рисунка следует, что при одинаковой плотности теплового потока коэффициент теплоотдачи для водного раствора диэтилового эфира выше, чем к воде.

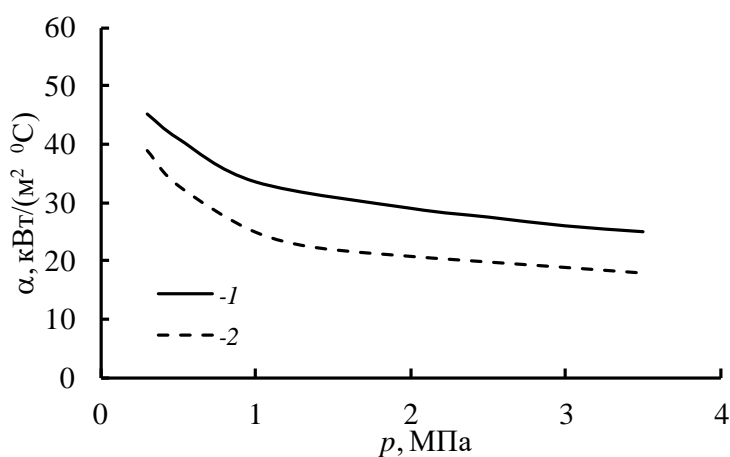


Рис. 14. Зависимость коэффициента теплоотдачи α от давления p при постоянной плотности теплового потока, $q = 3.4$ мВт/м²: 1 — эмульсия диэтиловый эфир/вода, $C = 5.5$ об.%; 2 — дистиллированная вода.

В третьей главе представлены модель пузырькового кипения эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой, уравнения для расчета коэффициента теплоотдачи и плотности теплового потока. Здесь же приводятся результаты обработки экспериментальных данных.

В п. 3.1 рассмотрены две модели кипения эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой. В одной модели [11, 12] предполагается, что в кипении не участвует дисперсионная среда, и существуют только две основные причины зародышеобразования: контакт между капельками дисперсной фазы и нагретой поверхностью и столкновения между перегретыми каплями и пузырьками пара. Авторы предполагают, что быстрый рост парового пузыря при вскипании перегретой капельки дисперсной фазы вызывает турбулентные вихри в окружающей ее эмульсии, что также способствует контакту перегретых капелек дисперсной фазы с поверхностью раздела жидкость-пар. В другой модели [13] рассматривается турбулентный поток монодисперсной эмульсии и предполагается, что участки поверхности капельки дисперсной фазы могут деформироваться, вызывая в нем локальное снижение капиллярного давления относительно остальной части капли. Такое понижение капиллярного давления снижает температуру перегрева, необходимую для возникновения зародышеобразования.

В п. 3.2 приведены результаты обобщения полученных экспериментальных данных по теплоотдаче к эмульсиям. На основании полученных экспериментальных данных предложена следующая модель пузырькового кипения эмульсий:

- вскипание капелек дисперсной фазы происходит по механизму спонтанного зародышеобразования. Это предполагает образование пузырьков пара без влияния поверхности нагрева, но не означает, что зародышеобразование обязательно гомогенно. Зарождение паровой фазы может происходить и на легкоактивируемых центрах кипения в системе дисперсная фаза – дисперсионная среда, плотность и активность которых существенно ниже, чем на твердой поверхности

- при кипении эмульсии теплота от поверхности нагрева, вначале воспринимается тонким слоем эмульсии, соприкасающимся с охлаждаемой поверхностью, а затем идет на испарение вскипевших капелек дисперсной фазы

- образующиеся паровые пузырьки, под действием Архимедовой силы, уходят из теплового пограничного слоя, увлекают прилегающие нагретые объемы эмульсии, а освободившееся место занимает новая порция эмульсии.

Исходя из принятой модели, предложено несколько уравнений для расчета основных характеристик теплообмена при кипении эмульсий. Для описания режима развитого пузырькового кипения эмульсий получено уравнение

$$Nu = A_2 C_0 Ar Pr M^{-1} f_{\Sigma},$$

где A_2 – эмпирическая константа, C_0 – концентрация эмульсии, $Nu = \frac{\alpha D}{\lambda_c}$,

$Ar = \frac{(\rho_{\Sigma} - \rho_{\Phi}) g \rho_{\Phi} D^3}{\eta_{\Sigma}^2}$, $Pr = \frac{\eta_{\Sigma} c_{p\Phi}}{\lambda_c}$ – числа Нуссельта, Архимеда и Прандтля,

соответственно, $M = \frac{c_{p\Phi} \Delta T}{r}$ – число метастабильности дисперсной фазы

эмульсии, $f_{\Sigma} = 1 - \exp(-J\nu\tau)$ – доля вскипающих капелек от тех, что находятся

в тепловом пограничном слое. Зависимость числа Нуссельта Nu от комплекса $C_0 Ar Pr M^{-1} [1 - \exp(-Jv\tau)]$ при пузырьковом кипении эмульсий показана на рис. 15.

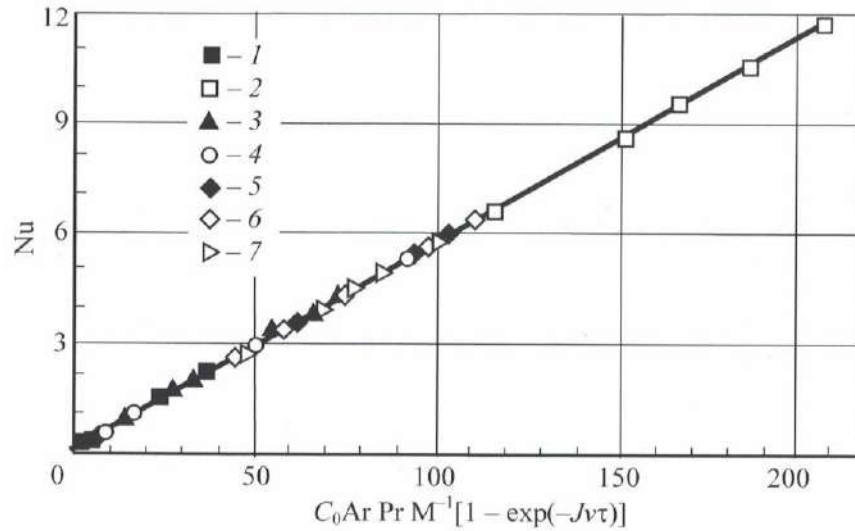


Рис. 15. Обобщение опытных данных по теплоотдаче к эмульсиям: 1 – н-пентан/глицерин, 2 – фреон-113/вода, 3 – вода/ПМС-300, 4 – вода/ПЭС-4, 5 – вода/ПЭС-5, 6 – вода/масло ВМ-1С, 7 – этиловый спирт/масло ВМ-1С.

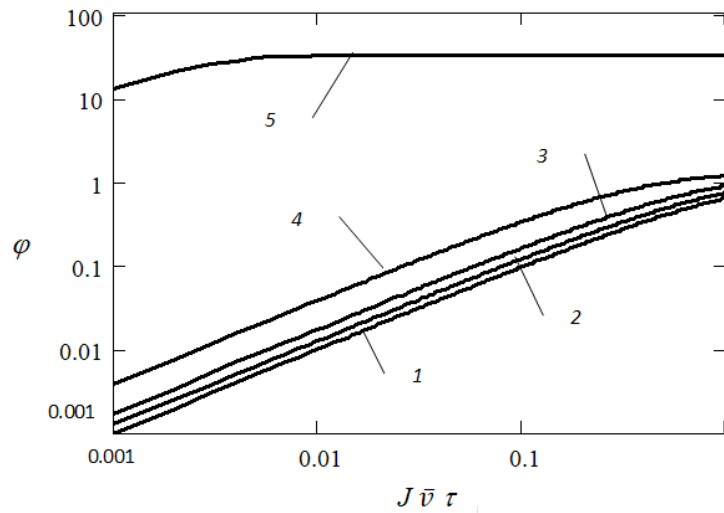


Рис. 16. Зависимость коэффициента φ от $Jv\tau$ для эмульсии с разными распределениями капелек дисперсной фазы по их объемам: 1 – монодисперсное распределение, 2 – бидисперсное, 3 – треугольное, 4 – равномерное, 5 – куполообразное.

На основе принятой модели кипения проведена оценка влияния дисперсионного состава эмульсии на плотность теплового потока. Для полидисперсных эмульсий, то есть таких эмульсий, у которых дисперсная фаза состоит из капелек разного объема получено

$$q = q_M \varphi = A \frac{c(\rho_3 - \rho_\phi'') gr \rho_\phi (6\bar{v}/\pi)^{2/3}}{\eta_3 (\rho_3/\rho_\phi)^{2/3}} \varphi,$$

где q_M – плотность теплового потока для монодисперсной эмульсии, т.е. эмульсии с одинаковым размером капелек дисперсной фазы; φ –

поправочный множитель учитывающий дисперсионный состав эмульсии;
 $\varphi = \frac{1}{V_{\Sigma}} \int_0^{\infty} \left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^{2/3} v [1 - \exp(-Jvt)] F(v) dv$; V_{Σ} – объем дисперсной фазы эмульсии; $F(v)$ – счетная дифференциальная функция распределения капелек по их объемам v ; t – время нахождения капелек дисперсной фазы в тепловом пограничном слое. Анализ выражения для коэффициента φ показал (рис. 16), что его значение увеличивается с ростом крупных капелек дисперсной фазы эмульсии.

В п. 3.3 получена зависимость начала цепной активации центров кипения от перегрева капелек дисперсной фазы эмульсии. Если известна величина задержки начала кипения $\Delta T_{зд1}$ для некоторой заданной концентрации эмульсии C_1 , то, предполагая, что плотность центров кипения для заданной дисперсной фазы величина постоянная, для остальных концентраций эмульсий с заданным средним диаметром капелек получено $\Delta T_{зд} = \frac{k}{\sqrt[3]{C}}$, где k – коэффициент, равный 11 К для эмульсии вода/масло ВМ-1С и 25 К для эмульсии н-пентан/глицерин. Проверка полученной зависимости возникновения цепной активации от температуры греющей поверхности показана на рис. 17. Линии проведены по результатам обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов по однопараметрическому уравнению $\Delta T_{зд} = \frac{k}{\sqrt[3]{C}}$. Из рис. 17 видно, что в пределах точности экспериментальных данных зависимость $\Delta T_{зд} = \frac{k}{\sqrt[3]{C}}$ подтверждается.

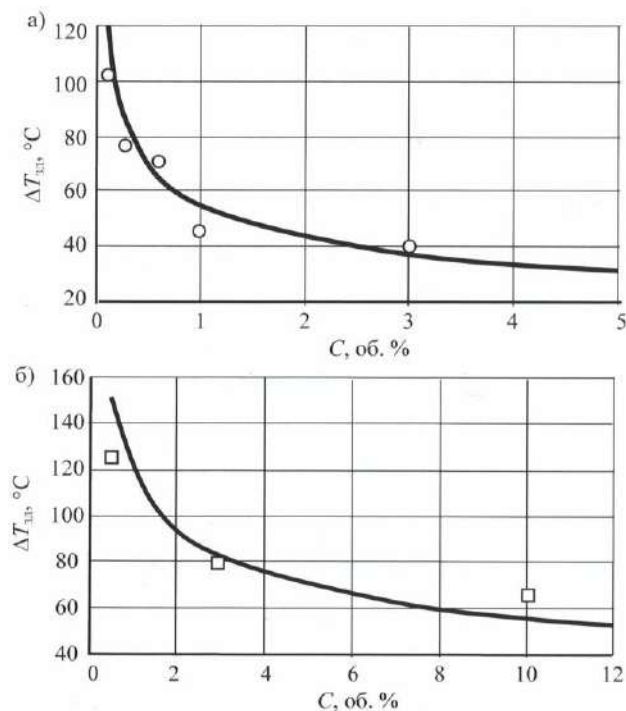


Рис. 17. Связь между концентрацией дисперсной фазы эмульсии и температурой задержки начала кипения: а) – эмульсия вода/масло ВМ-1С, б) – н-пентан/глицерин.

Четвертая глава посвящена экспериментальному изучению характеристик теплообмена и режимов течения двухфазного потока при кипении эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой в миниканале с внутренним диаметром 1.1 мм.

В п. 4.1 рассмотрены фундаментальные вопросы, связанные с кипением жидкостей в мини и микроканалах. Несмотря на большое число работ в области исследования теплообмена и режимов течения двухфазного потока в мини и микроканалах, некоторые фундаментальные проблемы до настоящего времени не совсем поняты. Отсутствует общепринятое определение границы разделения на мини и микроканалы, нет согласованных выводов о доминирующем механизме теплообмена при кипении (конвективный или пузырьковый), отсутствуют общепринятые методы прогнозирования коэффициента теплоотдачи, режимов двухфазного потока, пульсаций давления и т.д.

В п. 4.2 приведены известные из литературы работы, в которых исследован теплообмен при кипении эмульсий в условиях вынужденного потока в мини и микроканалах. Были определены цели и задачи экспериментального исследования, методы экспериментального исследования и визуализации режимов течения двухфазного потока, выбраны типы жидкостей образующих эмульсии.

В п. 4.3 представлено описание экспериментальных установок, рабочего участка и методики проведения опытов. Использовался жидкостный обогрев миниканала и нагрев миниканала постоянным электрическим током. При жидкостном нагреве миниканал устанавливался горизонтально в стеклянной ячейке, через которую прокачивался нагретый глицерин с заданной температурой. Температура внешней поверхности миниканала определялась при помощи двух термопар установленных на ней внутри ячейки, а температура исследуемых жидкостей на входе и выходе из канала микро термопарами установленными непосредственно в потоке жидкости. Такая компоновка экспериментальной установки позволяла с применением скоростной видеосъемки визуализировать процессы, связанные с зарождением, ростом и коалесценцией паровых пузырей непосредственно внутри миниканала. Недостаток экспериментальной установки состоял в том, что используя жидкостной нагрев, температуру внешней стенки миниканала невозможно было повысить выше температуры кипения глицерина (290°C). Поэтому использовалась экспериментальная установка с электрическим нагревом миниканала, а структура двухфазного потока визуализировались на выходе из него.

Схема экспериментального участка при электрическом нагреве миниканала показана на рис. 18. Прозрачный стеклянный канал с внешним диаметром 2.5 мм и внутренним диаметром 1.1 мм, через который прокачивался исследуемый теплоноситель, устанавливался горизонтально. Температура жидкости на входе в канал T_{in} и выходе из него T_{out} измерялась микротермопарами, установленными в потоке жидкости. Температура внешней стенки канала измерялась 5 микро термопарами, расположенными

на расстоянии около 10 мм друг от друга. В качестве нагревателя использовалась намотанная виток к витку нихромовая проволока диаметром 0.3 мм, нагрев которой осуществлялся постоянным электрическим током. Колебания давления в потоке измерялись датчиком избыточного давления. Исследуемые жидкости помещались в термостат, термостатировались и прокачивались центробежным насосом. Перед началом и после завершения каждой серии опытов производился контроль массового расхода жидкости.

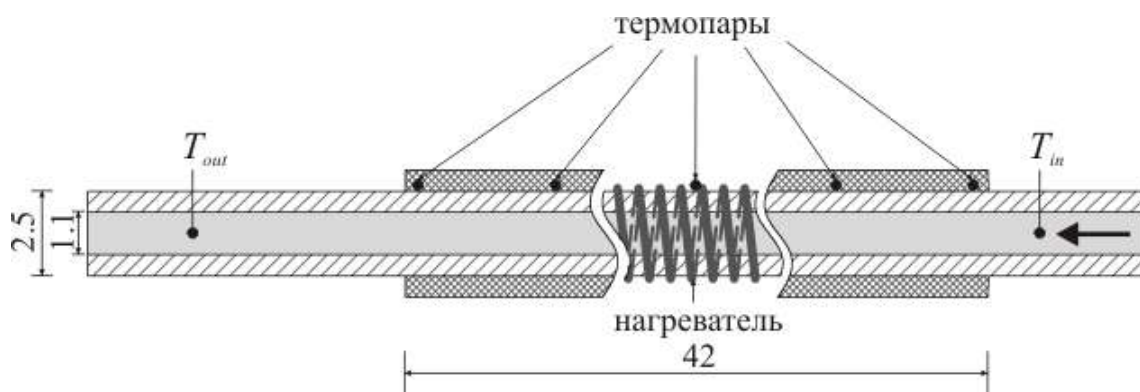


Рис. 18. Схема экспериментального участка. Стрелкой показано направление потока.

Результаты экспериментального исследования анализировались по средним значениям коэффициента теплоотдачи от внутренней стенки канала к исследуемым теплоносителям и средней температуре внутренней стенки канала.

В п. 4.4 приведены результаты экспериментального исследования при кипении в вынужденном потоке воды и эмульсий фреон-11/вода, н-пентан/вода, вода/ПМС-20 и н-пентан/глицерин в миниканале. Показаны режимы течения двухфазного потока, характеристики теплообмена, анализ пульсаций давления и температур при неустойчивости двухфазного потока.

Было выделено четыре режима течения двухфазного потока: пузырьковый, снарядный, кольцевой и дисперсный. На рис. 19 показана структура течения двухфазного потока при кипении эмульсии н-пентан/вода при электрическом нагреве миниканала.

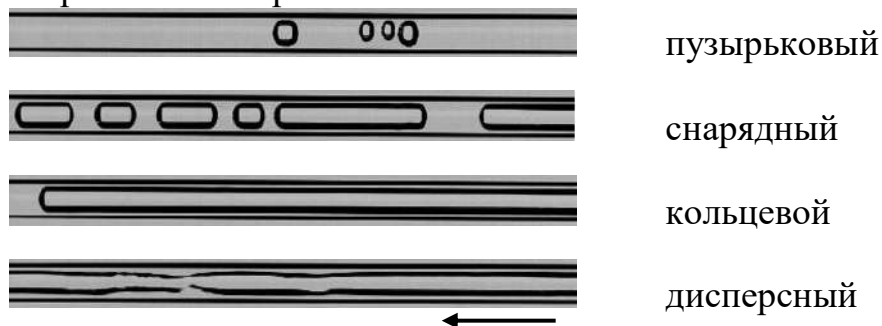


Рис. 19. Режимы течения двухфазного потока. Стрелкой показано направление потока.

Пузырьковый режим двухфазного потока характеризуется наличием отдельных, изолированных друг от друга пузырьков пара в потоке жидкости.

При пузырьковом режиме теплота от стенок канала отводится за счет пузырькового кипения капелек эмульсии и конвективного переноса теплоты эмульсией. При снарядном режиме двухфазного потока, в результате коалесценции отдельных паровых пузырей образуются паровые снаряды, которые занимают все поперечное сечение канала. Поток снарядов отделен от поверхности канала тонкой пленкой жидкости. Начало и окончание снарядов имеют полусферическую форму. Особенностью снарядного режима является наличие жидкостных перемычек между снарядами.

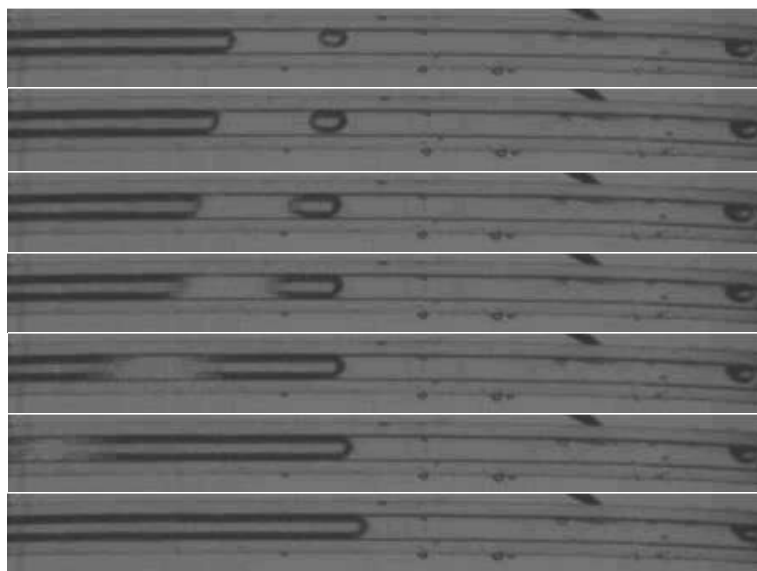


Рис. 20. Динамика роста парового пузыря при кольцевом режиме двухфазного потока. Жидкостный нагрев миниканала.

Кольцевой режим характеризуется наличием тонкой пленки жидкости на стенке канала, а ядро потока занимает паровая фаза. При кольцевом режиме канал по длине можно условно разделить на две области. Одна область, которая расположена ближе к выходу из канала, занята двухфазным потоком, а другая, ближе к входу в канал, жидкой фазой. На участке занятой двухфазным потоком конвективное испарение через тонкую жидкостную пленку является основным механизмом отвода теплоты. На участке занятой жидкой фазой происходит инициирование и эволюция паровых пузырей. С ростом температуры нагрева стенки канала, область занятая двухфазным потоком сдвигается по направлению к входу в канал, что способствует подавлению пузырькового кипения в канале. Рост образующихся паровых пузырей, на участке канала занятой однофазной жидкостью, ограничен стенками канала. При своем росте они достигают противоположной стенки канала и начинают расти в осевом направлении, прежде чем оторваться от стенки канала (рис. 20). При росте парового пузыря в осевом направлении, давление в нем превышает давление подачи жидкости в канал, что приводит к образованию обратных течений - реверсу течения жидкости, что вызывает нестабильность расхода жидкости. При кольцевом режиме кроме реверса течения наблюдаются пульсации давления и температуры жидкости, как на входе в канал, так и на выходе из него. Нестабильные процессы при

кольцевом режиме инициировали механические колебания всей экспериментальной установки.

Высыхание жидкой пленки на стенке канала приводит к кризису кипения, при котором наблюдается дисперсный режим (рис. 19), который характеризуется наличием пара и мелких капелек жидкости в ядре потока.

Принципиальных различий в формах течения двухфазного потока при кипении воды и эмульсий н-пентан/вода и фреон-11/вода не обнаружено. Отличие состоит только в температурах стенки канала, при которых формируется тот или иной режим двухфазного потока.

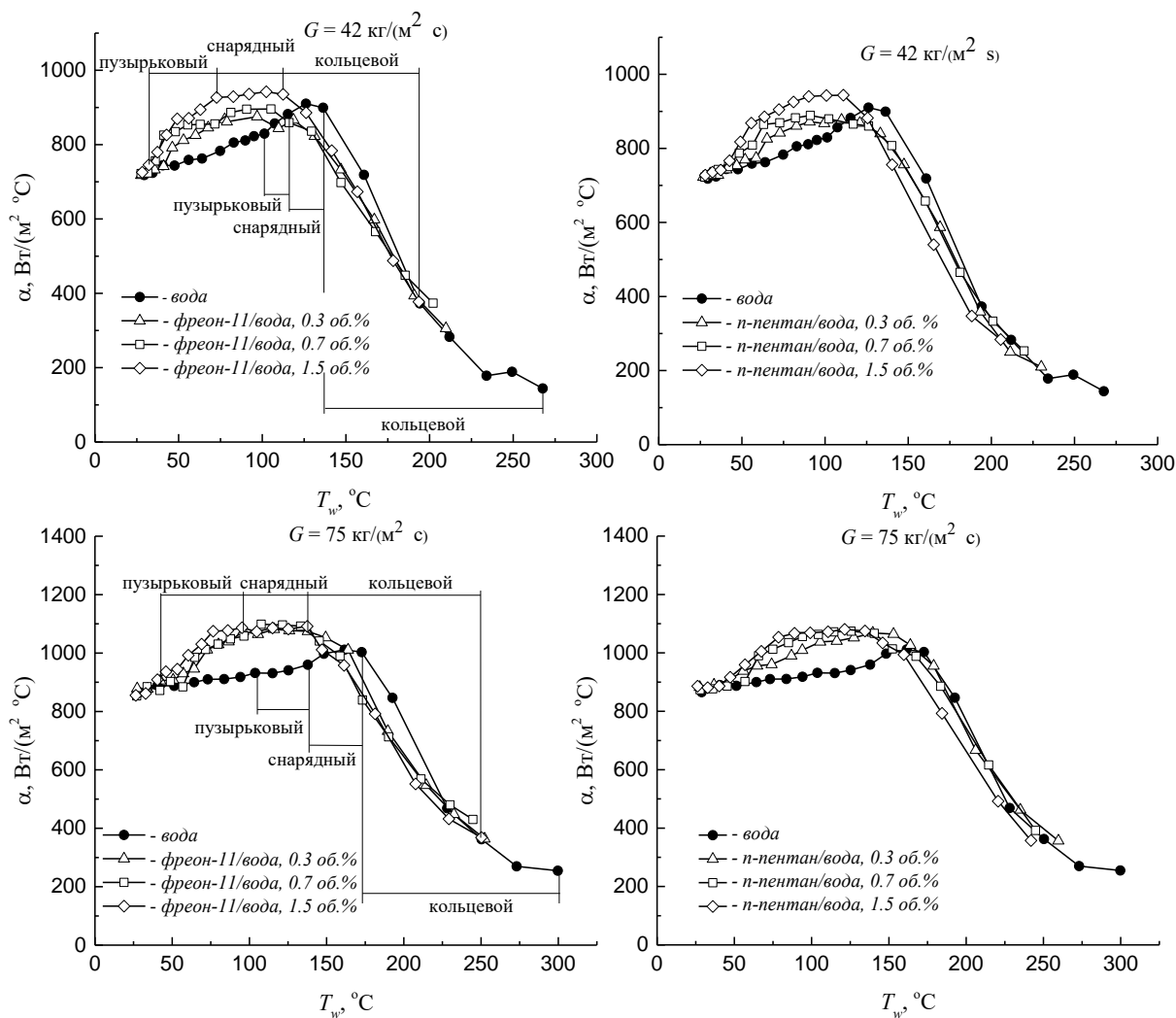


Рис.21. Теплоотдача от внутренней поверхности миниканала к воде и к эмульсиям фреон-11/вода и н-пентан/вода.

Опыты с водой и эмульсиями фреон-11/вода и н-пентан/вода проведены при массовых скоростях потока 42 и 75 кг/(м² с) и концентрациях эмульсии 0,3, 0,7 и 1,5 об. %. Зависимость среднего значения коэффициента теплоотдачи от внутренней поверхности миниканала к воде и к эмульсиям показана на рис. 21. Для воды и эмульсии фреон-11/вода с концентрацией 1,5 об. % выделены участки соответствующие пузырьковому, снарядному и кольцевому режиму двухфазного потока. Как видно из рисунка, коэффициент теплоотдачи зависит от режима течения двухфазного потока.

Опыты с водой проведены при недогреве на входе в канал $\Delta T_{sub} = T_s - T_{in}$ составляющем $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Из-за большого недогрева до температуры кипения, вода на начальном участке канала нагревалась, а кипение происходило на центрах расположенных ближе к выходу из него. При снаряжном режиме, с ростом нагрева стенки канала, зародышеобразование смещается ближе к входу в канал, из-за чего наблюдается рост коэффициента теплоотдачи. С началом кольцевого режима происходит снижение среднего значения коэффициента теплоотдачи. Образование пробки из двухфазного потока на выходе из канала и ограниченность пространства для роста пузырьков пара приводят к возникновению реверса течения воды и колебаниям избыточного давления в потоке. При дальнейшем нагреве стенки канала, с ростом частоты зародышеобразования, кольцевой режим занимает значительную часть длины канала, что приводит к усилению колебания давления и флуктуаций температуры воды на входе и выходе из канала. К спаду значений α при кольцевом режиме также приводит частичное и кратковременное высыхание пленки жидкости на стенке канала.

В опытах с эмульсиями температура недогрева ΔT_{sub} капелек фреона-11 и н-пентана составляла 3 и $16\text{ }^{\circ}\text{C}$, соответственно. Как и при кипении эмульсий в большом объеме, кипение эмульсий фреон-11/вода и н-пентан/вода в миниканале начинается при температурах стенки канала выше температуры насыщения дисперсной фазы. С ростом концентрации эмульсии температура начала кипения снижается. Это связано с тем, что при увеличении концентрации эмульсии число капелек дисперсной фазы контактирующих со стенкой канала и, следовательно, способных кипеть, увеличивается. Пузырьковый режим двухфазного потока в исследованных эмульсиях формируется за счет кипения только капелек дисперсной фазы эмульсии и однофазной конвекции воды. Причем с началом вскипания капелек фреона-11 и н-пентана наблюдается рост среднего значения коэффициента теплоотдачи.

Снарядный режим двухфазного потока при кипении фреона-11/вода и н-пентан/вода на начальном этапе формируется за счет кипения только капелек дисперсной фазы. При достижении температуры стенки канала температуры кипения воды, в формировании снаряжного режима участвует пар образованный в результате кипения капелек дисперсной фазы и воды. С ростом концентрации эмульсии переход от пузырькового режима к снаряжному и от снаряжного к кольцевому происходит при более низких температурах стенки канала. Наличие низкокипящей дисперсной фазы в воде способствует образованию неустойчивости двухфазного потока при более низких тепловых потоках по сравнению с чистой водой.

Неустойчивость двухфазного потока приводит к ухудшению параметров теплопередачи, а также к снижению критического теплового потока. На рис. 22 представлены характерные колебания температуры жидкости на входе, двухфазного потока на выходе из канала, колебание избыточного давления в системе на начальном участке кольцевого режима, а

также при переходе от кольцевого режима к дисперсному режиму для воды и эмульсии фреон-11/вода с концентрацией 1.5 об. %.

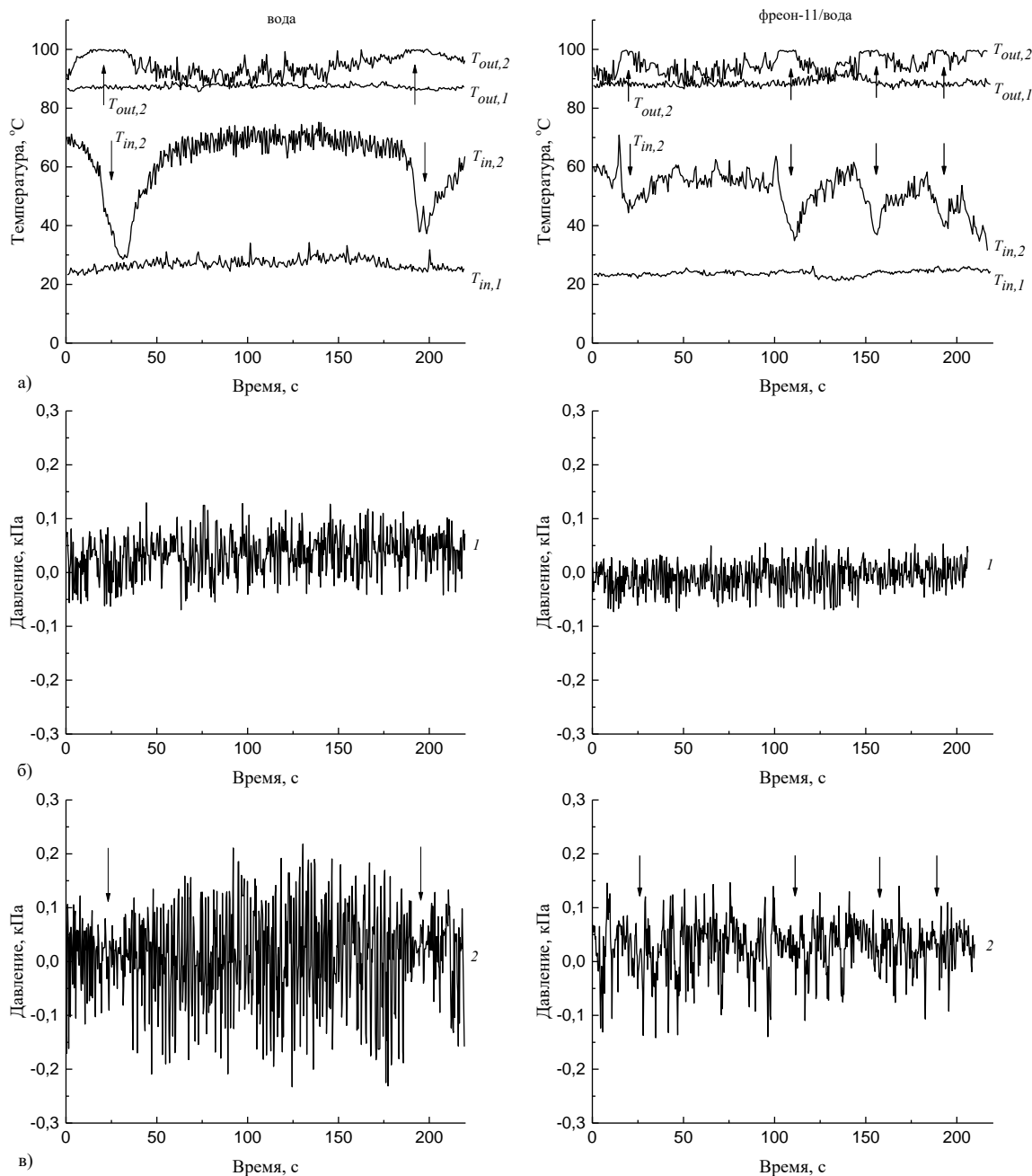


Рис. 22. Колебание температуры жидкости на входе T_{in} и выходе T_{out} из канала и избыточного давления в системе. Индекс 1 относится к началу кольцевого режима; 2 – окончание кольцевого режима. $G = 42 \text{ кг/м}^2 \text{ с}$; вода: 1 – $T_{w,in} = 126 \text{ }^\circ\text{C}$, $q = 70.1 \text{ кВт/м}^2$; 2 – $T_{w,in} = 267 \text{ }^\circ\text{C}$, $q = 26.5 \text{ кВт/м}^2$; эмульсия фреон-11/вода, концентрация 1.5 об. %: 1 – $T_{w,in} = 102 \text{ }^\circ\text{C}$, $q = 52.2 \text{ кВт/м}^2$; 2 – $T_{w,in} = 193 \text{ }^\circ\text{C}$, $q = 45.9 \text{ кВт/м}^2$.

Как видно из рис. 22, на начальном участке кольцевого режима, с образованием реверса течения, начинаются колебания температуры жидкости на входе T_{in1} и температуры двухфазного потока T_{out1} на выходе из канала. Характерные колебания избыточного давления в системе с началом реверса течения показаны на рис. 22б. При дальнейшем нагреве канала, с

ростом частоты зародышеобразования, колебания T_{in} и T_{out} и избыточного давления в системе усиливаются.

На рис. 22а также показано колебание температуры жидкости на входе T_{in2} и температуры двухфазного потока T_{out2} на выходе из канала при высыхании пленки жидкости на стенках канала и повторном смачивании стенок канала исследуемыми жидкостями. При высыхании стенок канала реверс течения прекращается, колебания давления в системе затухают (на рис. 22в показано стрелками), расход жидкости стабилизируется, вследствие чего температура исследуемых жидкостей на входе в канал начинает понижаться (на рис. 22а показано стрелками вниз). Температура двухфазного потока на выходе из канала T_{out2} становится равной температуре насыщения воды, а для эмульсии температуре насыщения дисперсионной среды (на рис. 22а показано стрелками вверх). При достижении температуры жидкости на входе в канал T_{in2} некоторого недогрева в канале опять возобновляется кольцевой режим кипения, который через определенное время, с ростом T_{in2} , сменяется дисперсным. Смена режимов высыхания и повторного смачивания стенок канала жидкостью, как это видно из рис. 22а, в эмульсиях происходит чаще, чем при кипении воды.

Опыты с силиконовым маслом ПМС-20 и эмульсией вода/ПМС-20 проведены при двух массовых потоках 60 и 80 кг/(м² с) и концентрациях эмульсии 0.1, 0.5, 1.0 и 2.0 об.%. Температура исследуемой жидкости на входе в канал поддерживалась постоянной и была равна 25 °С. Температура кипения ПМС-20 выше 250 °С. В наших опытах при кипении ПМС-20 первые паровые пузыри в потоке регистрировались при средней температуре внутренней стенки канала 304 °С. Опыты с эмульсией вода/ПМС-20 проводились до температуры начала кипения ПМС-20. Зависимость теплового потока q от температурного напора ΔT для однофазной конвекции ПМС-20 и двухфазного потока эмульсии показана на рис. 23.

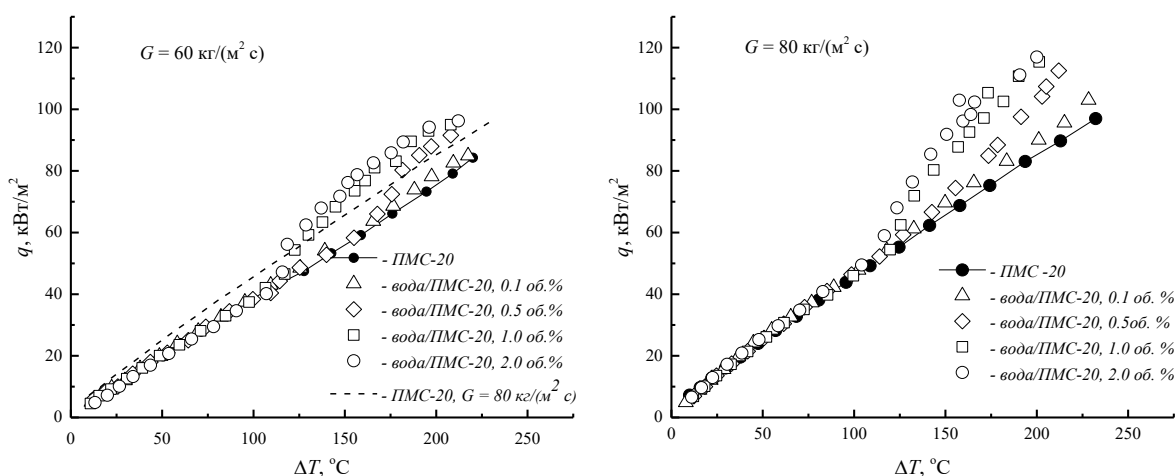


Рис. 23. Тепловой поток от стенки канала к исследуемым жидкостям.

В эмульсии вода/ПМС- 20 с концентрацией 0.1 об.%, вплоть до температуры начала кипения ПМС-20, наблюдается только пузырьковый режим. Это означает, что с ростом теплового потока, когда растет скорость и частота образования паровых пузырей, объема генерируемого пара при кипении эмульсии с концентрацией 0.1 об.% оказывается недостаточным для формирования снарядного режима. В эмульсии с концентрацией 0.5 об. % кипение начинается при $T_{w,in} = 164.7$ °С. С началом процесса нуклеации формируется пузырьковый режим, который, как и при кипении эмульсии с концентрацией 0.1 об.%, не влияет на теплоотдачу. Затем при $T_{w,in} = 225.2$ °С ($q = 58.3$ kW/m², $\Delta T = 155.0$ °С) пузырьковый режим сменяется снарядным режимом, при котором наблюдается рост q . При больших тепловых потоках в жидкостных перемычках отделяющих паровые снаряды наблюдается много мелких паровых пузырей и пересыщенных капелек воды. С ростом концентрации эмульсии до 1.0 и 2.0 об.% температура нуклеации дисперсной фазы незначительно снижается до $T_{w,in} = 162.7$ и 161.1 °С, соответственно, но формирование снарядного режима, при котором наблюдается рост q , происходит при более низких температурах $T_{w,in} = 171.4$ °С ($q = 44.7$ kW/m², $\Delta T = 111.8$ °С) и $T_{w,in} = 169.6$ °С ($q = 43.6$ kW/m², $\Delta T = 111.4$ °С). Увеличение теплоотдачи происходит при концентрациях 1.0 и 2.0 об. %, когда растет число способных кипеть капелек дисперсной фазы на внутренней стенке канала и формируется снарядный режим кипения.

Взрывное кипение в мини и микроканалах происходит при высыхании и повторном смачивании жидкостью стенок канала [14]. При этом образуются длинные паровые пузыри, которые растут в осевом направлении и могут вызывать нестабильность двухфазного потока.

В наших опытах взрывное вскипание вызвано кипением одной или нескольких капелек крупного размера. Так как эмульсия постоянно перемешивалась в термостате мешалкой, то она не стабилизировалась поверхностно-активным веществом (ПАВ). Оказалось, что при прокачке эмульсии по трубопроводу соединяющем термостат с миниканалом, в трубопроводе капельки дисперсной фазы при соприкосновении друг с другом коалесцируют и могут образовывать капли больших размеров 100 - 300 мкм. Крупные капли, попадая в миниканал, нагреваются и при контакте с горячей поверхностью стенки канала взрывообразно вскипают, генерируя большие объемы пара. При таком кипении образуются длинные паровые пузыри, которые растут в осевом направлении по направлению к входу и выходу из канала. Динамика перехода от снарядного режима к режиму с длинными паровыми пузырями показана на рис. 24. При прохождении длинного парового пузыря толщина пленки эмульсии, отделяющая стенку канала от потока пара, уменьшается, в результате чего капельки дисперсной фазы, находящиеся в пленке эмульсии, испаряются.

Взрывное вскипание крупных капелек дисперсной фазы вызывают колебания давления в потоке и колебания температуры стенки канала и двухфазного потока. Взрывной рост длинных паровых пузырей также вызывает механические колебания всей экспериментальной установки.

Опыты с эмульсией вода/ПМС-20, стабилизированной ПАВ, проведены с концентрациями дисперсной фазы 0.1, 0.5, 1.0 и 2.0 об.% и при массовом потоке $80 \text{ кг}/(\text{м}^2 \text{ с})$. В качестве ПАВ использовался Tween-80. Исследования показали, что в стабилизированных эмульсиях отсутствует коалесценция капелек дисперсной фазы и, как результат, отсутствует взрывное вскипание крупных капелек с образованием длинных пузырей пара. Полученные кривые кипения для эмульсий, стабилизированных поверхностно-активным веществом, мало отличаются от кривых кипения эмульсий без добавок ПАВ. В стабилизированной эмульсии снижается температура начала кипения дисперсной фазы. Одна из причин такого снижения связана с изменением межфазного натяжения на границе дисперсная фаза – дисперсионная среда – поверхность миниканала. Опыты так же показали, что увеличение концентрации Tween-80 в воде от 0.25 до 0.50 об.% не оказывает существенного влияния на температуру кипения и теплоотдачу.

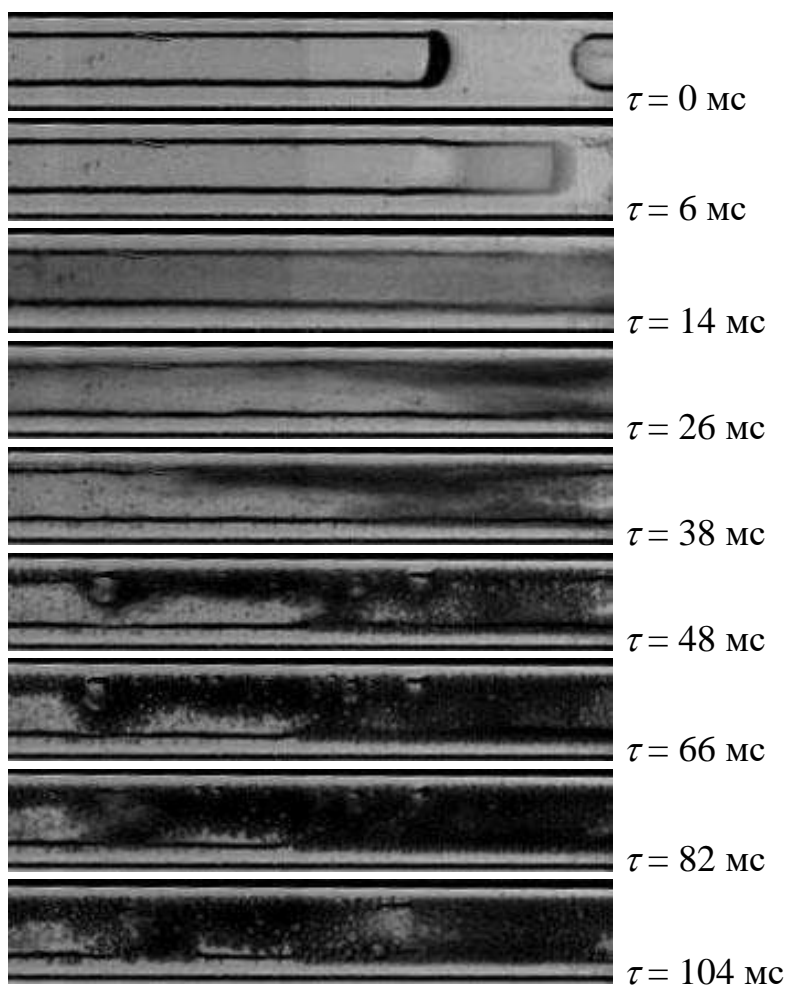


Рис.24. Динамика перехода от снарядного режима к режиму с длинными паровыми пузырями.

Опыты с глицерином и эмульсией н-пентан/глицерин проведены при массовом потоке $34 \text{ кг}/(\text{м}^2 \text{ }^{\circ}\text{C})$. Температура рабочей жидкости на входе в канал поддерживалась постоянной, $T_{in} = 25.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Эмульсия н-пентан/глицерин была стабилизирована путем введения в глицерин 0,25 об.% поверхностно-активного вещества Tween-80. Исследования проведены с

концентрациями 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 и 6.0 об.% н-пентана в глицерине. Средний по объему диаметр капелек состоял из капелек диаметром 5 – 10 мкм.

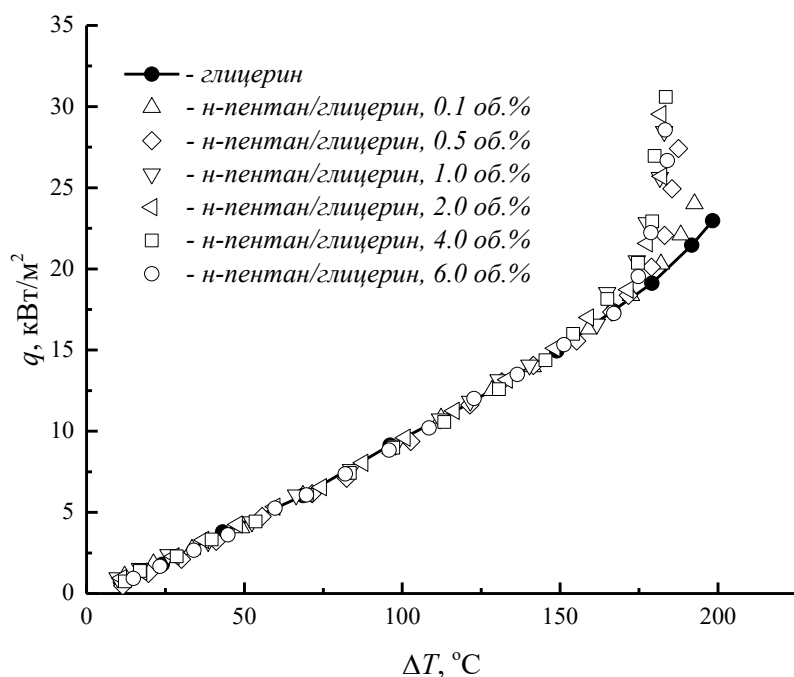


Рис.25. Тепловой поток, отводимый от внутренней стенки миниканала глицерином и эмульсией н-пентан/глицерин.

Зависимость теплового потока q от температурного напора ΔT для глицерина и эмульсии н-пентан/глицерин показана на рис. 25. Тепловой поток с ростом температуры нагрева линейно растет для однофазной конвекции глицерина. Капельки н-пентана поступали в миниканал с недогревом до температуры кипения $\Delta T_{sub} = 12.1$ °C. В эмульсии с концентрацией 0.1 об. % капельки н-пентана начинали кипеть при средней температуре стенки канала $T_{w,in} = 56.3$ °C ($q = 2.72$ кВт/м², $\Delta T = 25.3$ °C). С ростом температуры стенки канала до температуры начала кипения глицерина наблюдался только пузырьковый режим кипения. При увеличении концентрации эмульсии, двухфазный поток состоял вначале из пузырькового режима, который затем сменялся снарядным. Например, в эмульсии с концентрацией 2,0 об.% кипение капелек н-пентана начиналось при средней температуре внутренней стенки канала $T_{w,in} = 44.6$ °C ($q = 1.54$ кВт/м², $\Delta T = 16.9$ °C) с образованием пузырькового режима, который сменяется снарядным при $T_{w,in} = 87.6$ °C ($q = 4.41$ кВт/м², $\Delta T = 52.4$ °C). Как видно из рис. 25, до некоторых тепловых нагрузок двухфазные потоки не влияют на теплоотдачу. Теплота от стенки канала затрачивается на испарение капелек дисперсной фазы, но основное тепло отводится однофазной конвекцией дисперсионной средой. Линейная зависимость q от ΔT наблюдается для эмульсии н-пентан/глицерин до некоторых температур нагрева, после чего регистрируется рост отводимого теплового потока, не зависимо от

концентрации эмульсии. Для эмульсии с концентрацией 2.0 об.% такой рост начинается при средней температуре стенки канала $T_{w,in} = 242.1$ °С и температуре двухфазного потока $T_{out} = 115.9$ °С ($q = 18.4$ кВт/м², $\Delta T = 171.5$ °С). Одна из причин такого поведения связана с изменениями физических свойств глицерина, которые в значительной мере зависят от температуры. Наиболее сильно изменение затрагивает вязкость глицерина, которая снижается в 285 раз при нагреве от 20 до 120 °С.

На рис. 26 показаны колебания температуры T_{out} двухфазного потока эмульсии н-пентан/глицерин с концентрацией 2.0 об. %, при разных тепловых потоках. Пунктирной линией отмечена температура предельного перегрева н-пентана, которая равна $T_{lim} = 146.1$ °С. При совместном кипении капелек н-пентана и глицерина, температура двухфазного потока на выходе из испарителя превышает температуру предельного перегрева н-пентана. В этом случае все поступающие в канал капельки н-пентана кипят не только на стенке канала, но и в объеме эмульсии, по механизму гомогенного зародышеобразования. Паровая фаза в ядре потока на выходе из испарителя, как и при кольцевом режиме, становится сплошной. Двухфазный поток при температурах выше температуры предельного перегрева н-пентана остается стабильным, что подтверждается отсутствием колебания температуры T_{in} эмульсии на входе в канал.

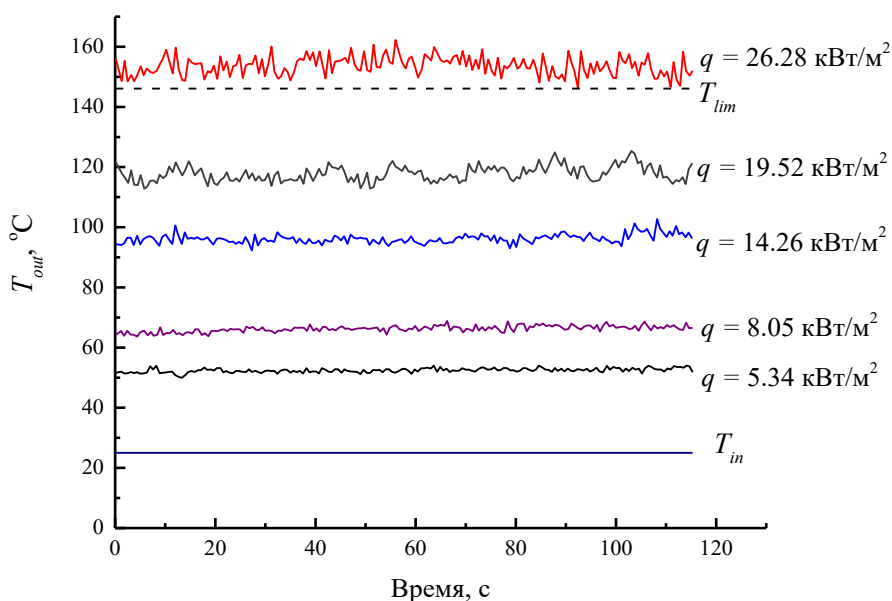


Рис. 26. Колебания температуры двухфазного потока при кипении эмульсии н-пентан/глицерин.

В п. 4.4 рассмотрены возможные области применения эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой. Эмульсии с низкокипящей дисперсной фазой не находят широкого применения в качестве эффективных теплоносителей. Одной из областей их использования рассматривается возможность охлаждения электронных устройств [6, 12] и микропроцессоров [9]. Возможными объектами для использования эмульсий с низкокипящей

дисперсной фазой в качестве охлаждающих жидкостей являются системы охлаждения тиристорных преобразователей переменного тока. Тиристорные преобразователи применяются в цветной и черной металлургии для питания электроприводов, электролизеров, дуговых вакуумных печей и др. При работе преобразователей имеют место электрические потери и происходит их саморазогрев. Система жидкостного охлаждения тиристорных преобразователей большой мощности (более 1000 кВт) представляет собой замкнутый трубчатый контур, через который при помощи насоса прокачивается теплоноситель. Тиристоры крепятся на одном из участков контура, а на противоположном участке устанавливается холодильник, через который прокачивается техническая проточная вода.

На рис. 27 показана фотография основных элементов экспериментальной установки имитирующей станцию охлаждения тиристорных преобразователей. Установка представляет собой замкнутый циркуляционный контур, по которому исследуемая жидкость прокачивается центробежным насосом через воздушный холодильник и нагреватель, выполненный из трубы с внешним диаметром 24 мм и внутренним диаметром 16 мм. Длина нагреваемого участка составляла 300 мм.

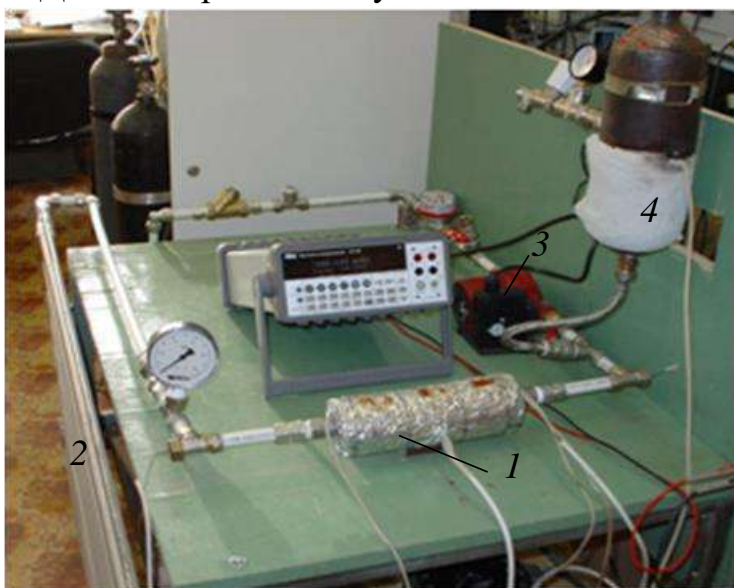


Рис. 27. Фотография основных элементов экспериментальной установки; 1 – измерительная труба, 2 – холодильник, 3 – насос, 4 – резистор.

На рис. 28 представлена зависимость среднего коэффициента теплоотдачи от средней температуры внутренней стенки трубы к исследуемым жидкостям при массовом потоке $10 \text{ кг}/(\text{м}^2 \text{ с})$. Температура нормального кипения н-пентана $36.1 \text{ }^\circ\text{C}$. Из рис. 28 видно, что в условиях вынужденного течения кипение эмульсии н-пентан/вода с концентрацией 1.0 об. % начинается при средней температуре внутренней стенки канала около $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Дальнейшее повышение температуры внутренней стенки трубы резко повышало коэффициент теплоотдачи к эмульсии. При температурах внутренней стенки канала ниже температуры кипения воды рост коэффициента теплоотдачи возрастает более чем в два раза, по сравнению с

водой. Проведенные исследования показали, что для увеличения охлаждающей способности воды, например, в станциях охлаждения тиристорных преобразователей, достаточно ввести в нее небольшое количество (до 2 об. %) н-пентана.

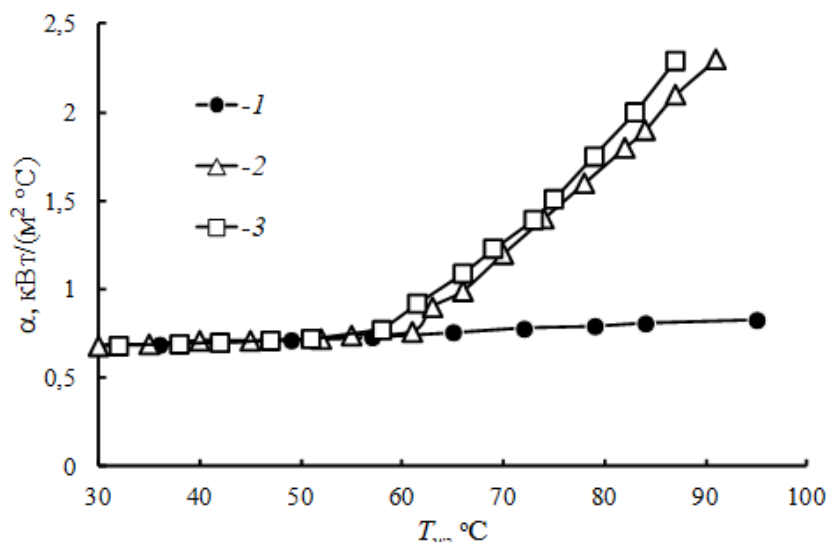


Рис. 28. Зависимость среднего коэффициента теплоотдачи от средней температуры внутренней стенки трубы при вынужденном течении исследуемых жидкостей. $G = 10 \text{ кг}/(\text{м}^2 \text{ с})$: 1 – вода; 2, 3 – эмульсия н-пентан/вода с концентрацией 1.0 и 2.0 об. %, соответственно.

В **заклучении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Экспериментально исследовано явления взрывного вскипания перегретых капелек эмульсии. Установлено, что взрывное вскипание капелек эмульсии может происходить не только при температурах близких к температуре предельного перегрева, но и при существенно более низких температурах, когда активируются низкотемпературные центры кипения. Центры кипения можно разделить на две группы – центры, активирующиеся в объеме капелек, и центры, активирующиеся на их поверхности. Определяющим фактором активации низкотемпературных центров кипения является импульс давления, возникающий при вскипании перегретой капельки эмульсии.
2. Показано, что цепная активация низкотемпературных центров кипения инициируется случайной активацией одного из них. Взрывное вскипание перегретой капельки эмульсии на низкотемпературном центре кипения способствует активации нескольких соседних центров кипения, что в свою очередь приводит к дальнейшей активации других центров кипения. Предложен механизм цепного зародышеобразования в перегретых капельках эмульсии.
3. Проведены комплексные исследования теплообмена при кипении на проволочных нагревателях и в трубе с внутренним диаметром 16 мм нового класса теплоносителей – эмульсий с низкокипящей дисперсной

фазой. Опыты поставлены с эмульсиями, у которых в пузырьковом кипении участвуют только капельки дисперсной фазы (вода/масло ВМ-1С, вода/ПЭС-5, вода/ПМС-20, н-пентан/глицерин, этиловый спирт/масло ВМ-1С и др.) и с эмульсиями, у которых в кипении участвует дисперсная фаза совместно с дисперсионной средой (н-пентан/вода, фреон-113/вода, диэтиловый эфир/вода, фреон-11/вода).

- У всех исследованных эмульсий обнаружена задержка начала кипения по сравнению с началом кипения чистой диспергированной жидкости. Величина задержки начала кипения зависит от концентрации и размера капелек дисперсной фазы.

Обнаружено существенное расширение температурного интервала режима пузырькового кипения эмульсий. Если при кипении воды разница между температурой начала кипения и температурой кризиса пузырькового кипения составляет не более 30°C , то при кипении эмульсий такая разность температур значительно больше и может превышать 150°C .

Определены режимы теплообмена, при которых коэффициент теплоотдачи к эмульсии в 1,2 – 4 раза превышает значения, полученные для чистой дисперсионной среды.

Установлено, что критическая плотность теплового потока при кипении эмульсии зависит от концентрации и размера капелек дисперсной фазы эмульсии.

Показано, что путем введения в эмульсию поверхностно-активных веществ и адсорбентов можно управлять числом центров кипения, а следовательно и интенсивностью теплоотдачи.

- Впервые с применением скоростной видеосъемки визуализирован процесс пузырькового кипения эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой. Выявлены механизмы вскипания перегретых капелек дисперсной фазы, как на поверхности нагрева, так и в тепловом пограничном слое.
- Предложена модель пузырькового кипения эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой. Получены формулы для определения коэффициента теплоотдачи от нагреваемой поверхности к кипящей эмульсии. Выполнен анализ влияния дисперсионного состава эмульсии на плотность теплового потока. Отмечено хорошее согласие результатов расчета с экспериментальными данными, что свидетельствует в пользу предложенной модели пузырькового кипения эмульсии, которая качественно правильно отражает процессы протекающие вблизи нагреваемой поверхности.
- Экспериментально исследован теплообмен при кипении в вынужденном потоке ряда эмульсий в миниканале диаметром 1.1 мм. С применением скоростной видеосъемки визуализированы структуры течения двухфазного потока при кипении воды и эмульсий в миниканале. Установлено, что температурные интервалы пузырькового и снарядного режимов кипения эмульсий н-пентан/вода и фреон-11/вода, при которых наблюдается рост коэффициента теплоотдачи, у исследованных эмульсий

шире, чем в чистой воде. Наличие дополнительной паровой фазы в миниканале, состоящей из пара низкокипящей жидкости, способствует появлению неустойчивости двухфазного потока и кризиса кипения при более низких тепловых потоках, чем в чистой воде.

В широком диапазоне тепловых нагрузок исследован теплообмен при кипении только капелек дисперсной фазы эмульсии вода/силиконовое масло ПМС-20 и н-пентан/глицерин в миниканале. Показано, что при кипении капелек дисперсной фазы формируются только пузырьковый и снарядный режимы течения двухфазного потока, без перехода к неустойчивому кольцевому режиму. Установлено, что при кипении эмульсии н-пентан/глицерин двухфазный поток при температурах выше температуры предельного перегрева н-пентана остается стабильным. Результаты исследований теплообмена при кипении эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой могут являться основой для создания теплообменного оборудования с эмульсией в качестве рабочей жидкости.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. Bulanov N.V. Bubble boiling of emulsions with a low-boiling disperse phase / N.V. Bulanov, V.G. Baidakov, **В.М. Гасанов** // Heat Transfer Research. – 2001. – V.32. – №1-3. – P. 24-32, 1,04 / 0,35 п.л. (Scopus).
2. Bulanov N.V. Mode of Bubble Boiling of Emulsion with a Low-Boiling Dispersed Phase / N.V. Bulanov, V.G. Baidakov, **В.М. Гасанов** // Heat Transfer Research. 2002. – V.33. – №3-4. – P. 166-168, 0,36 / 0,12 п.л. (Scopus).
3. Буланов Н.В. Экспериментальная установка для изучения цепной активации низкотемпературных центров кипения в перегретых каплях жидкости / Н.В. Буланов, **В.М. Гасанов** // Коллоидный журнал. – 2005. – Т. 67. – № 5. – С. 531-536, 0,69 / 0,35 п.л. (Web of Science, Scopus).
4. Буланов Н.В. Результаты экспериментального исследования теплообмена эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой / Н.В. Буланов, **В.М. Гасанов**, Е.А. Турчанинова // Теплофизика высоких температур. – 2006. – Т. 44. – № 2. – С. 268-284, 1,96 / 0,65 п.л. (Web of Science, Scopus).
5. Буланов Н.В. Особенности кипения эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой / Н.В. Буланов, **В.М. Гасанов** // Инженерно физический журнал. – 2006. – Т. 79. – № 6. – С. 81-84, 0,46 / 0,23 п.л. (Scopus).
6. Bulanov N.V. Special features of boiling of emulsions with a low-boiling dispersed phase / N.V. Bulanov, **В.М. Гасанов** // Heat Transfer Research. – 2007. – V.38. – №3. – P. 259-273, 1,62 / 0,81 п.л. (Web of Science, Scopus).
7. Bulanov N.V. Peculiarities of boiling of emulsions with a low-boiling disperse phase / N.V. Bulanov, **В.М. Гасанов**, V.A. Khmilnin // Journal of Engineering Thermophysics. – 2007. – V. 16. – №3. – P. 224-230, 0,81 / 0,27 п.л. (Scopus).

8. Bulanov N.V. Peculiarities of boiling of emulsions with a low-boiling disperse phase / N.V. Bulanov, **В.М. Гасанов** // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2008. – V. 51. – №4. – P. 1628-1632, 0,58 / 0,29 п.л. (Web of Science, Scopus).
9. Буланов Н.В. Критический объем и цепная активация центров кипения в эмульсиях с низкокипящей дисперсной фазой / Н.В. Буланов, **В.М. Гасанов**, Г.Н. Муратов // Теплофизика высоких температур. – 2009. – Т.47. – № 6. – С. 899-904, 0,69 / 0,23 п.л. (Web of Science, Scopus).
10. **Гасанов В. М.** Теплоотдача при кипении эмульсии на поверхности тонких проволочек / **В. М. Гасанов**, Н.В. Буланов // Теплофизика высоких температур. – 2010. – Т. 48. – № 3. – С. 477-480, 0,46 / 0,23 п.л. (Web of Science, Scopus).
11. Буланов Н.В. Зависимость начала цепной активации центров кипения от перегрева капелек дисперсной фазы эмульсии / Н.В. Буланов, **В.М. Гасанов** // Теплофизика высоких температур. – 2011. – Т. 49. – № 2. – С. 221-224, 0,46 / 0,23 п.л. (Web of Science, Scopus).
12. **Гасанов В.М.** Влияние концентрации и размера капелек дисперсной фазы эмульсии на характер теплообмена при кипении эмульсии / **В.М. Гасанов**, Н.В. Буланов // Теплофизика высоких температур. – 2014. – Т. 52. – № 1. – С. 93-99, 0,81 / 0,40 п.л. (Web of Science, Scopus).
13. **Gasanov В.М.** Effect of the droplet size of an emulsion dispersion phase in nucleate boiling and emulsion boiling crisis / **В.М. Gasanov**, N.V. Bulanov // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2015. – V. 88. – P. 256-260, 0,58 / 0,29 п.л. (Web of Science, Scopus).
14. **Gasanov В.М.** Boiling of emulsion with a low-boiling disperse phase. High-speed filming / **В.М. Gasanov** // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – V. 94. – P. 66-74, 1,04 п.л. (Web of Science, Scopus).
15. **Гасанов В.М.** Ухудшение теплообмена при кипении эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой / **В.М. Гасанов** // Теплофизика высоких температур. – 2018. – Т. 56. – №4. – С. 582-585, 0,46 п.л. (Web of Science, Scopus).
16. **Gasanov В.М.** Flow boiling of water and emulsions with a low-boiling disperse phase in minichannels / **В.М. Gasanov** // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – V. 126. Part B. – P. 9-14, 0,69 п.л. (Web of Science, Scopus).
17. **Gasanov В.М.** Boiling of disperse-phase droplets in a forced flow of emulsion in a minichannel / **В.М. Gasanov** // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – V. 142. – Article 118454, 0,92 п.л. (Web of Science, Scopus).

Публикации в других научных изданиях:

18. **Гасанов В.М.** Зависимость задержки начала кипения эмульсий от дисперсионного состава и концентрации поверхностно-активных веществ / **В.М. Гасанов**, Н.В. Буланов // Метастабильные состояния и фазовые

- переходы. Вып. 4. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. – С. 55-58, 0,23 / 0,11 п.л.
19. Буланов Н.В. Поверхностное вскипание капелек перегретой жидкости / Н.В. Буланов, **Б.М. Гасанов** // Метастабильные состояния и фазовые переходы. Вып. 5. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – С. 72-80, 0,52 / 0,26 п.л.
20. Буланов Н.В. Активация центров кипения в эмульсиях с низкокипящей дисперсной фазой / Н.В. Буланов, **Б.М. Гасанов**, Н.В. Другомилова // Метастабильные состояния и фазовые переходы. Вып. 6. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – С. 95-106, 0,70 / 0,35 п.л.
21. Буланов Н.В. Влияние малых добавок адсорбентов на величину задержки начала кипения / Н.В. Буланов, **Б.М. Гасанов** // Метастабильные состояния и фазовые переходы. Вып. 7. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. – С. 36-46, 0,64 / 0,32 п.л.
22. Буланов Н.В. Цепная активация центров кипения и критический объем эмульсии при кипении ее дисперсной фазы / Н.В. Буланов, **Б.М. Гасанов**, В.А. Хмыльнин, Г.Н. Муратов // Метастабильные состояния и фазовые переходы. Вып. 9. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. – С. 27-39, 0,75 / 0,18 п.л.
23. Буланов Н.В. Интенсификация теплообмена и цепная активация центров кипения при использовании эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой / Н.В. Буланов, **Б.М. Гасанов** // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2010. – №3 (7). – С. 29-37, 1,04 / 0,52 п.л.
24. **Гасанов Б.М.** Влияние размера капелек дисперсной фазы эмульсии на теплообмен при пузырьковом кипении эмульсии. Кризис кипения / **Б.М. Гасанов**, Н.В. Буланов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2014. – №2 (22). – С. 12-18, 0,81 / 0,40 п.л.
25. Буланов Н. В. Теплообмен при кипении воды и эмульсий в миниканале / Н. В. Буланов, **Б. М. Гасанов** // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2019. – №1 (41). – С. 4-15, 1,38 / 0,69 п.л.

Список цитируемой литературы

1. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость / В.П. Скрипов. – М.: Из-во «Наука», 1972. – 312 с.
2. Скрипов В.П. Теплофизические свойства жидкостей. Справочник. / В.П. Скрипов, Е.Н. Сеницын, П.А. Павлов и др. – М.: Атомиздат, 1980. – 208 с.
3. Байдаков В.Г. Перегрев криогенных жидкостей / В.Г. Байдаков. Екатеринбург: УрО РАН, 1995. – 264 с.
4. Павлов П.А. Динамика вскипания сильно перегретых жидкостей / П.А. Павлов. Свердловск: УрО РАН, 1988. – 248 с.
5. Roesle M.L. An experimental study of boiling in dilute emulsions, part A / M.L. Roesle, F.A. Kulacki // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2012. – V. 55. – № 7-8. – P. 2160-2165.
6. Roesle M.L. An experimental study of boiling in dilute emulsions, part B / M.L. Roesle, F.A. Kulacki // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2012. – V. 55. – № 7-8. – P. 2166-2172.

7. Roesle. M.L. Boiling Heat Transfer to Dilute Emulsions From a Vertical Heated Strip / M.L. Roesle, D.L. Lunde, F.A. Kulacki // *Trans. ASME. Journal of Heat Transfer.* – 2015. – V.137. – № 4 – 041503.
8. Kulacki F.A. Pool Boiling of Dilute Emulsions on Flat Surfaces / F.A.Kulacki, C.T. Wood, D.R. Mendonza // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2020. – V. 151. – art. 119470.
9. Janssen D. Flow boiling of dilute emulsions / D. Janssen, F.A. Kulacki // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2017. – V. 115. – P. 1000-1007.
10. Pan H. Experimental investigation on subcooled boiling heat transfer of emulsified kerosene / H. Pan et al. // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2019. – V. 145. – Art. 118744.
11. Roesle M.L. Boiling of dilute emulsion – toward a new modeling framework / M.L. Roesle, F.A. Kulacki // *Industrial and Engineering Chemistry Research.* – 2010. – V. 49. – №11 – P. 5188-5196.
12. Roesle M.L. Boiling Heat Transfer in Dilute Emulsions / M.L. Roesle, F.A. Kulacki – Springer, New York. Springer Briefs in Applied Science and Technology, Thermal Engineering and Applied Science, 2013. – 121 p.
13. Rozentsvaig A.K. Mechanisms of boiling of an emulsion with a low-boiling disperse phase in a turbulent flow of homogeneous emulsion / A.K. Rozentsvaig, C.S. Strashinskii // *J. Eng. Phys. Thermophys.* – 2010. – V. 83. – №3 – P. 486-895.
14. Hestroni G. Explosive boiling of water in parallel micro-channels / G. Hestroni et al. // *Int. J. Multiphase Flow.* – 2005. – V. 31. – № 4. – P. 371-392.