

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, профессора Щеклеина Сергея Евгеньевича на диссертационную работу ГАСАНОВА Байрамали Мехрали оглы «Экспериментальное исследование механизмов кипения эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.01.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертационная работа Гасанова Байрамали Мехрали оглы посвящена экспериментальному исследованию механизмов кипения эмульсий, у которых капельки дисперсной фазы имеют температуру кипения ниже температуры кипения дисперсионной среды.

Эксперимент является одой из основных составляющих науки. По экспериментальным данным оценивается правильность теоретических гипотез, работоспособность разработанных установок. В науке постоянно ощущается нехватка экспериментальных данных. Связано это со сложностью подготовки и проведения экспериментов, нехваткой или несовершенством измерительного оборудования. Экспериментальное исследование теплообмена при кипении является важным разделом теплофизики, т.к. режим пузырькового кипения является наиболее эффективным способом отвода тепла. Способность кипящей жидкостью отводить высокие тепловые потоки от поверхности нагрева находит применение в различных промышленных приложениях: при охлаждении атомных реакторов, в теплоэнергетике, в химической и пищевой промышленности, в энергетических установках и т.д. На сегодняшний день важной задачей теплофизики также является повешение надежности работы устройств микроэлектроники, для чего необходимо поддерживать температуру элементов терморегулирования на заданном уровне, что можно достичь использованием двухфазного потока, в котором реализуется кипение жидкости. Автором в диссертационной работе рассматриваются задачи связанные с взрывным вскипанием перегретых капелек жидкости, теплоотдача к эмульсиям с низкокипящей дисперсной фазы при их кипении в условиях естественной конвекции и в вынужденном потоке в канале капиллярного размера. В этой связи тема диссертации является актуальной и обладает научной новизной и практической значимостью. Прежде всего, к ним можно отнести следующее:

- Исследовано взрывное вскипание перегретых капелек жидкости на низко- и высокотемпературных центрах кипения. Показано, что зависимость импульсов давления, возникающих при взрывном вскипании капелек перегретой жидкости, подчиняется закономерностям теории точечного взрыва. Экспериментально доказана возможность цепной активации низкотемпературных центров кипения, предложен механизм цепного зародышеобразования.
- 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. С применением скоростной видеосъемки визуализирован процесс пузырькового кипения эмульсий. Предложены способы управления интенсивностью теплоотдачи при пузырьковом кипении эмульсий.

- Предложена модель пузырькового кипения эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой. Получены расчетные формулы для определения коэффициента теплоотдачи и плотности теплового потока.
- 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 в широком диапазоне тепловых нагрузок только капелек дисперсной фазы эмульсии отсутствует неустойчивость двухфазного потока.

Научно-практическая значимость имеют следующие результаты работы полученные соискателем:

- 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.

В целом, диссертация Б.М. Гасанова выстроена в соответствии с требованиями, предъявляемыми к научным текстам. Стиль изложения ясный, лаконичный; качество оформления – хорошее. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка из 215 наименований. Общий объем диссертации 224 страницы.

**Во введении** обоснована актуальность, формулируется цель и основные задачи диссертационной работы, излагается научная новизна, фундаментальная и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения о личном вкладе и публикациях автора, апробации на Российских и международных конференциях.

**В первой главе** приводится определение перегретой жидкости, описываются методы захода в метастабильную область, методы экспериментального исследования достижимого перегрева жидкости, взрывное вскипания жидкости.

Описаны способы получения эмульсий, методы определения их дисперсионного состава и приводятся основные характеристики выбранных для исследования теплоносителей.

Представлены результаты экспериментальных исследований взрывного вскипания малых объемов перегретой жидкости и определения основных характеристик парового взрыва.

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.

Получена зависимость критического объема от плотности центров кипения при постоянной концентрации дисперсной фазы эмульсии. Критический объем эмульсии 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.

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

Приведены описание экспериментальных установок и методик измерения коэффициента теплоотдачи.

Представлены результаты экспериментального исследования теплообмена при кипении эмульсий. В исследованных эмульсиях обнаружено существенное расширение температурного интервала пузырькового кипения. Определены режимы теплообмена, при которых коэффициент теплоотдачи в 1,2 – 4 раза превышает значения, наблюдаемые при работе с чистыми жидкостями.

Представлены результаты исследования теплообмена с мелко- и крупнодисперсными эмульсиями.

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

Описаны результаты визуализации процесса пузырькового кипения эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой.

**В третьей главе** описаны известные из литературы модели пузырькового кипения эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой

На основании полученных во второй главе экспериментальных данных предложена модель пузырькового кипения эмульсий.

Представлены несколько уравнений для определения плотности теплового потока от нагреваемой поверхности к кипящей эмульсии. Приведены результаты обобщения полученных экспериментальных данных.

На основе принятой модели кипения проведена оценка влияния дисперсионного состава эмульсии на плотность теплового потока.

Получена зависимость начала цепной активации центров кипения от перегрева капелек дисперсной фазы эмульсии.

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментального исследования характеристик теплообмена и режимов течения двухфазного потока при кипении эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой в миниканале.

Представлены фундаментальные вопросы, связанные с кипением жидкостей в мини и микроканалах и приведены известные из литературы работы, в которых исследован теплообмен при кипении эмульсий в условиях вынужденного потока в мини и микроканалах.

Представлено описание экспериментальных установок, методики проведения опытов и расчета среднего значения коэффициента теплоотдачи.

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, колебания давления и температур при неустойчивости двухфазного потока.

Рассмотрены возможные области применения эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой.

**В заключении** формулируются основные результаты, полученные в диссертации. Значимость результатов работы для науки и практики продемонстрирована как в диссертации, так и автореферате.

#### **Вопросы и замечания оппонента.**

По диссертационной работе имеется ряд вопросов и замечаний.

1. В зависимости от метода получения эмульсий размеры капель низкокипящей фазы и их распределение по объему будут различаться- автор ограничивается только определением модальных размеров капель.
2. При повышении температуры и давления возникают эффекты, способствующие коалесценции капель- автором эти эффекты не учитываются.
3. При значительных объемах эмульсии в энергетическом оборудовании возникают эффекты расслоения и неоднородности концентрации эмульсии, что приведет к неравномерности отвода тепла.
4. При малых концентрациях капель в дисперсионной среде возникает вероятностный механизм попадания капли на нагреваемую поверхность и в

тепловой пограничный слой. Этот эффект автором не рассмотрен- эмульсия полагается гомогенной.

5. Инициирование механизма цепного вскипания взрывным вскипанием отдельной капли требует пояснения, т.к. импульс повышения давления приводит к росту температуры насыщения и может подавить распространение дальнейшего вскипания эмульсии.

6. Длительная устойчивость состава эмульсии в условиях больших объемов и переменной температуры – важнейшее условие практического применения эмульсионного охлаждения, требует дополнительных исследований.

7. Использование пьезоэлектрических датчиков давления, расположенных на значительном расстоянии от точки вскипания требует учета механической инерции объема среды, через которую распространяется импульс давления, а также ее диссипативных характеристик.

8. В работе не проводилась предварительная дегазация компонентов эмульсии, что создает неопределенность во влиянии растворенных газов на процессы парообразования.

9. При измерениях теплоотдачи в канале температура стенки измерялась припаянными термопарами, что вносит погрешность в результаты измерения. При толщине стенки канала 2 мм правильно было бы произвести зачеканку в стенку.

10. Требуется пояснения немонотонный характер зависимости теплоотдачи для чистой воды от температуры стенки (рис.6б поз.-1).

#### **Заключение оппонента.**

Диссертационная работа Гасанова Б.М. « Экспериментальное исследование механизмов кипения эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой», соответствует паспорту специальности 01.01.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника. Результаты диссертационного исследования достаточно полно опубликованы в открытой печати. Основные положения диссертации полностью отражены в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях (17 публикаций), внесенных в Перечень журналов и изданий, утвержденных Высшей аттестационной комиссией и Аттестационным советом УрФУ. Работы Б.М. Гасанова хорошо апробированы на всероссийских и международных конференциях.

Таким образом, диссертационная работа Б.М. Гасанова актуальна, содержит новые научные результаты, имеет значимость для науки и представляет практическую ценность. Выводы и рекомендации имеют достаточно обоснованный характер.

Проверка основного текста диссертации в системе «Антиплагиат ВУЗ» показала ее достаточную итоговую оригинальность по отношению к ранее опубликованным работам, на заимствованный и указанный в тексте диссертации материал или отдельные результаты приведены соответствующие ссылки на автора и (или) источник заимствования таких материалов или результатов.

По своей актуальности, объему выполненных исследований, научному содержанию, новизне и практической значимости результатов работа полностью

практическую ценность. Выводы и рекомендации имеют достаточно обоснованный характер.

Проверка основного текста диссертации в системе «Антиплагиат ВУЗ» показала ее достаточную итоговую оригинальность по отношению к ранее опубликованным работам, на заимствованный и указанный в тексте диссертации материал или отдельные результаты приведены соответствующие ссылки на автора и (или) источник заимствования таких материалов или результатов.

По своей актуальности, объему выполненных исследований, научному содержанию, новизне и практической значимости результатов работа полностью отвечает требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, а ее автор ГАСАНОВ Байрамали Мехрали оглы заслуживает присуждения ему ученой доктора физико-математических наук по специальности 01.01.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент:

Доктор технических наук (01.04.14 – Теплофизика и молекулярная физика), ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», заведующий кафедрой «Атомные станции и возобновляемые источники энергии».

Щеклеин Сергей Евгеньевич

16.09.2021

Адрес: 620002, Уральский федеральный округ, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

E-mail: [s.e.shcheklein@urfu.ru](mailto:s.e.shcheklein@urfu.ru)

Тел.: 8 (343) 375-95-08

Подпись С.Е. Щеклеина заверяю:

*ученый секретарь УрФУ (Морозова В.А.)*

