

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Гасанова Байрамали Мехрали оглы "**Эспериментальное исследование механизмов кипения эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой**", представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14-теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию механизмов кипения эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой. Кипение жидкостей – эффективный способ отвода тепла, давно используемый в различных теплоэнергетических устройствах и теплообменных аппаратах.

Хорошо известны основные способы интенсификации теплообмена, к которым, в частности, относятся: увеличение площади поверхности теплообмена путем формирования искусственной шероховатости или изготовлением ребер, организация вынужденного течения жидкости, турбулизация и закрутка потока и др. Совершенно другим подходом к решению задачи интенсификации теплоотдачи является использование двухфазного потока – эмульсии, состоящей из непрерывной дисперсионной среды и дисперсной фазы в виде капель. В работе рассматривается случай, когда капли дисперсной фазы имеют температуру кипения ниже температуры кипения дисперсионной среды. Несмотря на то, что режим конвективного теплообмена таких эмульсий практически сходен с аналогичным режимом дисперсионной среды, при пузырьковом кипении возникает целый ряд малоизученных особенностей, делающих этот способ интенсификации теплообмена весьма перспективным. Таким образом, проведение систематических экспериментальных исследований механизмов кипения эмульсий с низкодисперсной дисперсной фазой представляется **крайне актуальным**.

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.

Значительная часть первой главы носит обзорный характер. Приводятся работы по изучению перегретой жидкости; описываются известные методы захода в метастабильную жидкость; анализируются имеющиеся методы экспериментального исследования достижимого перегрева, взрывного вскипания жидкости (парового взрыва).

Далее в этой главе описаны способы получения эмульсий, методы определения их дисперсионного состава и приводятся основные характеристики выбранных для исследования теплоносителей.

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

Описана экспериментальная установка, позволяющая 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. Приводится полученная зависимость критического объема эмульсии от плотности центров кипения при постоянной концентрации дисперсной фазы эмульсии. В заключение главы приводятся выводы.

Во **второй главе** приведены результаты экспериментального исследования теплообмена при кипении эмульсий на поверхности тонких проволочных нагревателей (диаметр проволоки 50, 100 и 200 мкм) и в трубе (диаметр 16 мм).

Глава начинается с обзора, на основании которого формулируются цели и задачи исследования, обосновываются используемые методы и выбор типов жидкостей, образующих эмульсии. Далее описываются экспериментальные установки и методики измерения коэффициента теплоотдачи. Затем приводятся результаты экспериментов: полученные зависимости коэффициента теплоотдачи от температуры и концентрации дисперсной фазы; результаты по задержке начала кипения; установление влияние размеров капель дисперсной фазы на характеристики теплообмена.

Заключительный раздел главы посвящен результатам по ухудшению теплоотдачи при кипении эмульсий. Приводятся данные, касающиеся визуализации процесса пузырькового кипения эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой. Анализируются результаты экспериментов о влиянии введения в эмульсию различных добавок (активированный уголь в виде порошка с размерами частиц 1-30 мкм, наночастицы диоксида кремния, цеолит) на теплообмен, а также теплоотдачу эмульсий, образованной из частично растворимых жидкостей.

В **третьей главе** представлены результаты по обобщению экспериментальных данных при кипении эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой.

Глава начинается с обзора развитых на сегодняшний день моделей кипения эмульсий. Далее описывается модель кипения эмульсий, развитая автором. Приводится вывод основной расчетной формулы, содержащей связь между безразмерными критериями (числа Нуссельта, Архимеда, Прандтля, число метастабильности) которая затем уточняется на случай высоких концентраций дисперсной фазы, малых

температурных напоров и т.д. Приводится анализ полученных соотношений на случай, когда дисперсная фаза эмульсии представлена каплями различных размеров.

Проведена обработка большого массива экспериментальных данных по теплоотдаче к эмульсиям с низкокипящей дисперсной фазой с использованием полученной формулы (критериального соотношения). Получено хорошее соответствие между теорией и экспериментом.

**Четвёртая глава** посвящена экспериментальному изучению характеристик теплообмена и режимов течения двухфазного потока при кипении эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой в миниканале (диаметр 1 мм).

Глава начинается с обзора имеющихся работ, посвященных изучению кипения эмульсий в мини и микроканалах. Далее описаны экспериментальные установки, рабочие участки и используемые методики. Приводятся результаты экспериментального исследования кипения воды и различных эмульсий (фреон-11/вода, н-пентан/вода, вода/ПМС-20, н-пентан/глицерин) при их вынужденном движении в миниканале. Проанализированы режимы течения двухфазного потока, характеристики теплообмена, возникающие пульсации давления и температур. В конце главы рассмотрены области возможного практического применения эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой.

Получен целый ряд оригинальных результатов, определяющих **научную новизну и практическую значимость** диссертации: 1) установлено, что взрывное вскипание капелек эмульсии может происходить при существенно более низких температурах, чем температура предельного перегрева; 2) предложен механизм цепного зародышеобразования в перегретых капельках эмульсии; 3) обнаружен эффект задержки начала кипения по сравнению с началом кипения чистой жидкости, зависящий от концентрации и размера капель дисперсной фазы; 4) выявлено существенное расширение температурного интервала пузырькового кипения эмульсий, который может превышать  $150^{\circ}\text{C}$ ; 5) выявлены режимы теплообмена, при которых коэффициент теплоотдачи превышает (до 4-х раз) соответствующую характеристику для чистой дисперсионной среды; 6) предложены способы эффективного влияния числом центров кипения и интенсивностью теплоотдачи; 7) развита математическая модель пузырькового кипения эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой, которая верифицирована на имеющихся экспериментальных данных; 8) для течения в миниканале выявлен механизм появления неустойчивости двухфазного потока и кризиса кипения при более низких тепловых потоках, заключающийся в наличии дополнительной паровой фазы низкокипящей жидкости.

**Обоснованность** выводов диссертации не вызывает сомнения. Полученные результаты по исследованию механизмов кипения эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой, формируя цельную и непротиворечивую картину.

По содержанию диссертации можно высказать следующие **вопросы** и **замечания**:

1. Как изменятся результаты и выводы проведенного исследования, если размер миканала уменьшится (увеличится) в 2 раза?

2. В работе незаслуженно мало внимания уделено непростым вопросам, связанным с расслоением эмульсии и неоднородностью распределения капель дисперсной фазы в пространстве.

3. В диссертации недостаточно внимания уделено описанию назначения и частотным характеристикам используемого для измерения импульсов давления (при вскипании каждой отдельной капельки) пьезокерамического датчика.

4. Из материала диссертации не ясно, какое влияние оказывают крупные воздушные пузыри (возникающие на проволочке вследствие наличия растворенного в воде воздуха) на исследуемые процессы кипения эмульсий.

5. В работе практически не рассмотрено влияние сил тяжести и плавучести (сила Архимеда), действующих на капельки дисперсной фазы.

6. Имеется ряд недочетов при выводах формул и проведении оценок. Например, допущены неточности при нахождении величины критического объема эмульсии (на с. 51), объема капли дисперсной фазы (на с. 133).

7. Имеется вопрос по рис. 1.21, на котором приведена фотография «капелек воды, диспергированных в ПЭС-5». Указанная фотография имеется в монографии Буланова Н.В. «Взрывное вскипание жидкости...» (рис. 2.6) и относится к каплям n-пентана в глицерине.

8. В тексте диссертации, по-видимому, неоднократно допущена ошибка при указании размерности теплового потока (в тексте  $\text{мВт}/\text{м}^2$ , а должно быть  $\text{МВт}/\text{м}^2$ ).

Приведенные замечания носят характер рекомендаций и не снижают общую высокую оценку работы. Диссертация Гасанова Байрамали Мехрали оглы является завершенной научно-квалификационной работой, в которой исследованы сложные процессы кипения эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой. Проведенный автором анализ большого массива экспериментальных результатов способствует углублению понимания физики сложных нестационарных процессов кипения эмульсий. Все основные результаты диссертации опубликованы преимущественно в известных российских и международных журналах из перечня ВАК, а также в трудах международных конференций. Автореферат диссертации адекватно отражает содержание и основные выводы работы.

Диссертация Гасанова Байрамали Мехрали оглы «Эспериментальное исследование механизмов кипения эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой», представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника», выполнена на высоком научном уровне, удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней»,

