

ОТЗЫВ

официального оппонента

Булейко Валерия Михайловича на диссертацию Игольниково Александра Александровича «Нестационарный теплообмен в бинарном растворе с нижней критической температурой растворения», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность работы. Работа Игольникова А.А. посвящена исследованию теплоотдачи от проволочного нагревателя к двухкомпонентному раствору с нижней критической температурой растворения в не вполне устойчивых и неустойчивых состояниях методом управляемого импульсного нагрева. Под не вполне устойчивыми подразумеваются состояния перегрева относительно линии равновесия жидкость-пар или линии равновесия жидкость-жидкость. Неустойчивые состояния отвечают условиям перегрева раствора по отношению к диффузионной спинодали.

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена необходимостью развития технологий связанных с увеличением мощности микроэлектронных устройств при их одновременном уменьшении до мини- и микро размеров, что требует усовершенствования существующих методов интенсификации теплообмена. Альтернативой “традиционным” теплоносителям могут выступать двухкомпонентные растворы с ограниченной областью совместимости компонентов в координатах температура-концентрация. При пересечении границы сосуществования фаз такие смеси разделяются на две жидкие фазы. Процесс разделения может происходить либо путем зародышеобразования, либо спинодального распада. Спинодальный распад, инициированный в маловязких системах, является естественным турбулизатором при заданных параметрах потока теплоносителя. Необходимым условием при выборе раствора и соотношения компонентов в нем является наличие систематических исследований, посвященных изучению свойств растворов в широкой области изменения параметров, включая области не вполне устойчивых и неустойчивых состояний.

В работе продемонстрирована перспектива применения двухкомпонентных систем с нижней критической температурой растворения в качестве теплоносителя в условиях малых характерных времен нагрева (0,4-180 мс), размеров ($\sim 10^{-5}$ м) и больших плотностей теплового потока (около 10 МВт/м² и более).

Содержание работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, насчитывающего 96 наименований, и списка сокращений и условных обозначений. Работа изложена на 115 страницах, содержит 52 рисунка и 3 таблицы.

Во введении диссертации представлены актуальность диссертационного исследования, цели и задачи, научная новизна, степень разработанности проблемы. Также здесь отражены теоретическая и практическая значимость исследования, представлены защищаемые положения.

В первой главе обсуждаются характерные особенности теплообмена в двухкомпонентных растворах с ограниченной областью смешения компонентов, рассматривается их фазовое равновесие (ФР) с точки зрения термодинамики, представлены методы исследования ФР. Особое внимание в главе уделяется анализу изменения теплофизических свойств двухкомпонентных систем в окрестности критической точки растворения, выполненному в рамках квазистационарных измерений. Рассмотрены механизмы, по которым происходит разделение двухкомпонентных растворов по механизму жидкость-жидкость.

Во **второй главе** обсуждаются экспериментальные методы, заложившие основу измерений температуры достижимого перегрева жидкостей, среднего времени их жизни и свойств перегретой жидкости. Показано, что ввиду квазистатического характера большинства методов, их применимость ограничена небольшой глубиной захода за линию равновесия жидкость-пар. Углубление в область метастабильных состояний сопровождается ростом ошибок измерения или преждевременным образованием новой фазы, т.к. не удастся свести к минимуму неидеальность условий опыта.

При постановке задачи автором отмечена недостаточная изученность большого класса веществ, имеющего огромный потенциал в теплофизических приложениях – многокомпонентные растворы с ограниченной областью смешения компонентов. Более того, работы, посвященные систематическому исследованию области неустойчивых состояний таких систем, ограниченной диффузионной спиноподалью, фактически отсутствуют ввиду очевидных экспериментальных трудностей и, как следствие, недостаточного развития инструментальной и методологической базы.

Третья глава диссертационного исследования посвящена процедуре подготовки объектов исследования и аттестации платинового проволочного зонда – термометра сопротивления. Описаны методики импульсного нагрева в режиме постоянного тока, протекающего в цепи, содержащей проволочный нагреватель, и постоянной мощности, рассеиваемой с поверхности нагревателя. Представлены результаты моделирования нагрева платинового зонда в программе конечно-элементного анализа. Проанализированы неопределенности выполненных измерений. Продемонстрирована высокая чувствительность применяемых режимов нагрева к малому изменению избыточного давления.

Четвертая глава диссертации содержит экспериментальные результаты, полученные в ходе импульсного нагрева водного раствора ППГ-425 в режимах постоянного тока и постоянной мощности. Предварительно автором было определено положение линии сосуществования фаз и, на основе полученных данных, выполнена оценка положения диффузионной спиноподали. В рамках кратковременного теплового воздействия в режиме постоянного тока удалось добиться перегрева двухкомпонентного раствора на сотни градусов относительно линии равновесия жидкость-жидкость. Показано, что возможны существование кратковременных состояний раствора и измерение его свойств в области неустойчивых состояний. Теплофизические свойства раствора при переходе в область не вполне устойчивых и неустойчивых состояний в условиях малых характерных времен нагрева и размеров изменяются непрерывно. Для растворов с содержанием 10-70 масс. % ППГ-425 характерно возмущение монотонного хода кривой нагрева в результате разделения системы на разбавленную и концентрированную по содержанию полимера фазы. Для растворов с содержанием 80-90 масс. % ППГ фазового разделения, предшествующего спонтанному вскипанию жидкой системы, не наблюдается. С ростом избыточного давления в измерительной ячейке наблюдается сдвиг вправо по временной шкале момента начала фазового разделения жидкой системы.

Уникальными, с точки зрения характеристик переноса теплоты двухкомпонентными растворами с ограниченной областью смешения компонентов, являются результаты, полученные для систем с содержанием 20 и 30 масс.% полипропиленгликоля-425 при нагреве в режиме постоянной мощности тепловыделения. При рассмотрении температурных кривых можно выделить две характерные особенности:

- Несмотря на достаточно большую плотность теплового потока через поверхность платинового нагревателя ($q=9.2 \text{ МВт/м}^2$), кривые имеют тенденцию к выравниванию (на

врезках выделены участки, на которых температура зонда остается практически постоянной);

- При углублении в область неустойчивых состояний обычный порядок температурных кривых по отношению к ступенчатому росту давления изменяется на противоположный: более низким значениям интенсивности теплообмена начинают соответствовать более высокие значения давления.

Эффект формирования температурного “плато”, по мнению автора, связан с действием механизма спинодального распада неустойчивой системы, т.к. этот механизм является наиболее мощным и естественным релаксационным процессом в данной области фазовой диаграммы. Картина оказалась устойчивой к изменению параметров нагрева. Увеличение плотности теплового потока с поверхности платинового нагревателя не привело к существенному изменению характера переноса теплоты раствором. Увеличение длительности нагрева на порядок (с 15 до 180 мс) также качественно не изменило картину теплообмена вплоть до появления признаков макроконвекции.

Пятая глава диссертационного исследования посвящена теоретической интерпретации полученных экспериментальных данных. В рамках сформулированной модели получена зависимость температуры зонда от времени нагрева. Расчетные кривые имеют качественное согласование с экспериментальными данными, в том числе при изменении величины избыточного давления и электрической мощности, рассеиваемой с поверхности нагревателя. В частности, модель предсказывает формирование температурного “плато” как характерного признака релаксации неустойчивой смеси через механизм спинодального распада в заданных условиях опыта. Модель описывает раннюю стадию фазового разделения. На этом этапе основным считается диффузионный механизм роста доменов, т.е. возможность их слияния не учитывается. Значительное увеличение теплового потока к не вполне устойчивому и неустойчивому раствору связано с движением капель в поле градиента температуры, что аналогично эффекту Марангони.

Научная новизна. Выявлены характерные черты релаксации не вполне устойчивого и неустойчивого однофазного раствора вода/полипропиленгликоль-425 в стабильное двухфазное состояние при управляемом импульсном нагреве в масштабе малых характерных времен (0.4-180 мс), размеров ($\sim 10^{-5}$ м) и больших плотностей теплового потока (до 15 МВт/м²). Обнаружена пороговая интенсификация теплообмена, вызванная началом фазового разделения раствора.

Теоретическая значимость. Сформулирована теоретическая модель, которая на качественном уровне согласуется с результатами импульсных опытов. Показано, что значительное увеличение теплового потока к не вполне устойчивому и неустойчивому раствору может быть связано с движением доменов отдельных фаз в поле градиента температуры, что аналогично эффекту Марангони. Эффект Марангони, возникающий в условиях импульсного нагрева, когда домены находятся под действием значительного температурного градиента и не успевают вырасти до достаточно больших размеров, ранее не изучался.

Практическая значимость. Полученные в исследовании данные о теплоотдаче к двухкомпонентной смеси с нижней критической температурой растворения в условиях малых характерных времен нагрева и размеров демонстрируют перспективность использования таких систем в качестве теплоносителя в процессах с мощным локальным тепловыделением и создают практическую основу для их внедрения в микроканальные технологии.

Достоверность результатов подтверждается применением импульсных методов теплофизических измерений, основанных на анализе первичных данных, оценкой

относительных погрешностей измерений, высокой степенью повторяемости результатов в серии опытов, чувствительностью к малым изменениям параметров опыта и теплофизических свойств жидких систем.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на 11 международных и 12 всероссийских конференциях.

Публикации. Основные научные результаты исследования представлены в 13 научных работах, в том числе 12 статей опубликованы в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ и входящих в международную базу цитирования Scopus.

Замечания и вопросы:

1. Перед началом исследования характеристик переноса теплоты водным раствором полипропиленгликоля-425 в области не вполне устойчивых и неустойчивых состояний автор определяет положение бинодали на фазовой диаграмме жидкость-жидкость раствора ППГ-425 в координатах температура-концентрация методом точек помутнения (методом В.Ф. Алексеева). Результаты исследования представлены на рис. 4.1 диссертации. На этом же рисунке, для сравнения, автором представлены результаты других исследователей. Как видно из рисунка, представленные данные плохо согласуются между собой. Разброс точек линии фазового равновесия жидкость-жидкость в интервале концентраций ППГ-425 20 – 80 масс. % достигает $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и более. В тоже время существуют методы (например, метод прецизионной адиабатической калориметрии), позволяющие локализовать фазовые переходы расслаивания жидкость-жидкость с точностью менее чем $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, что не нашло отражения в работе.

2. В разделе 1.4.2 автор анализирует известные данные по теплопроводности вблизи критической точки растворения. Отмечена парадоксальность ситуации, когда одни данные вблизи КТ не содержат пика теплопроводности, другие, наоборот, содержат. Для ее прояснения, считаю, было бы полезно включить в раздел 1.4.2 таблицу с указанием ключевых экспериментальных параметров, а именно: автор – метод – масштаб изменения переменных – результат. И по ней уже подводить итог обсуждения.

3. Важный момент определения температуры жидкости в опытах на металлическом нагревателе состоит в оценке температурной невязки между температурой начала вскипания жидкости и регистрируемой установкой средней температурой нагревателя в данный момент времени. Действительно, автор пишет про «серию калибровочных опытов на «эталонных» жидкостях». Указано, что невязка составляет не более 5% после выполнения всех необходимых процедур. Но ничего не сказано про влияние продолжительности нагрева. Есть ли такое влияние и, если «да», учитывалось ли оно в обработке результатов?

4. Электрическая часть блок-схемы установки, представленной на рис. 3.6, описана достаточно подробно. В то же время, автор упускает из внимания вопрос об ориентации зонда (одинаковая или нет, если «нет», каково ее влияние), важный для теплофизики процесса.

5. По замыслу автора, рис. 3.9 должен показывать чувствительность импульсного метода к малому изменению внешнего параметра, в данном случае, избыточного давления. Тем не менее, путаница в цветах кривых на врезке и собственно на рисунке, не позволяет осуществить этот замысел.

6. Зависимости коэффициента интенсификации от давления, представленные на рис. 4.19, являются прямыми линиями. Автор не поясняет, является ли это универсальным результатом или, при расширении области изменения переменных,

возможен более сложный характер поведения зависимости коэффициента интенсификации от давления.

Заключение.

Диссертационная работа Игольников А.А. «Нестационарный теплообмен в бинарном растворе с нижней критической температурой растворения» соответствует паспорту специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника и представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, выполненную на актуальную тему. В работе продемонстрирована перспектива применения двухкомпонентных систем с нижней критической температурой растворения в качестве теплоносителя в условиях малых характерных времен нагрева, размеров и больших плотностей теплового потока. Представлена теоретическая интерпретация наблюдаемых в опытах явлений.

Считаю, что диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, а её автор Игольников Александр Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.

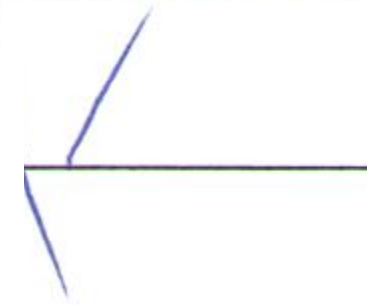
Официальный оппонент:

Доктор технических наук, доцент, ООО «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – «Газпром ВНИИГАЗ», главный научный сотрудник лаборатории физики пласта Московского центра исследования пластовых систем (керна и флюиды)

 Булейко Валерий Михайлович

Адрес: Московская область, г.о. Ленинский, п. Развилка, пр-д Проектируемый №5537, зд. 15, стр. 1. E-mail: buleikof@gambler.ru; Тел.: +7(498) 657-42-06.

Подпись В.М. Булейко заверяю Ведущий специалист Отдела кадров и трудовых отношений Управления по работе с персоналом ООО «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – «Газпром ВНИИГАЗ»

 Борисова Е.А.

