

ОТЗЫВ

официального оппонента

Рыльцева Романа Евгеньевича

на диссертацию

Игольникову Александра Александровичу

«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.

Экспериментальное исследование процессов, протекающих в жидкостях при сильно неравновесных условиях, является очень сложной задачей, важной как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения. Одной из важных задач является изучение нестационарных тепловых процессов, протекающих в расслаивающихся многокомпонентных жидкостях в условиях существенного перегрева (переохлаждения) относительно диффузионной спинодали. Подобные процессы на сегодняшний день практически не изучены в силу сложности проведения теплофизических экспериментов в области неустойчивости растворов. Помимо фундаментальной важности, интерес к изучению процессов нестационарного теплообмена обусловлен перспективами применения многокомпонентных растворов с ограниченной областью растворимости компонентов в качестве эффективной среды для охлаждения микроэлектронных устройств с возможностью отвода тепловых потоков большой плотности от нагреваемой поверхности. Действительно, при пересечении линии спинодали и попадании в зону абсолютной неустойчивости, разделение смеси происходит путем спинодального распада, который в маловязких системах является естественным турбулизатором. В этой связи, работа Игольникову А.А., направленная на исследование теплоотдачи в двухкомпонентном растворе с нижней критической температурой растворения в условиях существенного перегрева, безусловно, является актуальной. 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. Также разработан подход к исследованию теплофизических свойств таких растворов в области метастабильных и неустойчивых состояний.

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, защищаемые положения.

В **первой главе** обсуждаются характерные черты теплообмена в двухкомпонентных растворах с ограниченной областью смешения компонентов, рассматривается их фазовое равновесие с точки зрения термодинамики. Выполнен анализ изменения теплофизических свойств двухкомпонентных систем в окрестности критической точки растворения. Рассмотрены механизмы, по которым происходит разделение двухкомпонентных растворов по механизму жидкость-жидкость.

Во **второй главе** рассмотрены 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.

В главе отмечается недостаточная изученность многокомпонентных растворов с ограниченной областью смешения компонентов и обсуждается огромный потенциал данного класса систем в теплофизических приложениях.

Третья глава диссертационного исследования посвящена процедуре подготовки объектов исследования и аттестации платинового проволочного зонда, используемого в качестве термометра сопротивления. Описаны методики импульсного нагрева в двух режимах: режиме постоянного тока, протекающего в цепи, содержащей проволочный нагреватель, и режиме 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 полипропиленгликоля-425 (ППГ-425) в режимах постоянного тока и постоянной мощности. Автором определено положение линии сосуществования фаз раствора методом точек помутнения и выполнена оценка положения диффузионной спинодали. 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.% ППГ-425 при нагреве в режиме постоянной мощности тепловыделения. Несмотря на достаточно большую плотность теплового потока через поверхность платинового нагревателя ($q = 9.2 \text{ МВт/м}^2$), зависимости температуры зонда от времени демонстрируют «эффект плато», то есть достигают насыщения и далее остаются практически постоянными в течение времени нагрева (несколько мс). Кроме того, 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 является одним из наиболее интересных и практически важных результатов работы. Автор объясняет обнаруженный эффект действием механизма спиnodального распада неустойчивой системы, т.к. этот механизм является наиболее мощным и естественным релаксационным процессом в данной области фазовой диаграммы. Важно, что обнаруженный эффект оказался устойчивым к изменению параметров нагрева.

Пятая глава диссертационного исследования посвящена теоретической интерпретации полученных экспериментальных данных. Автором предложена простая модель теплопереноса, происходящего при спиnodальном распаде в условиях градиента температур. 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 нестабильной смеси через механизм спиnodального 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. Показано, что 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. Впервые исследована теплоотдача к двухкомпонентному раствору вода/полипропиленгликоль-425 в не вполне устойчивых и неустойчивых состояниях, недоступных для квазистатических экспериментальных методов. Выявлены характерные черты релаксации раствора 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) в широком диапазоне температур и давлений, вплоть до 800°C и 100 МПа, соответственно. Обнаружена пороговая интенсификация теплообмена, вызванная началом спиnodального распада неустойчивой системы. Отмечен трехстадийный механизм фазового разделения.

Теоретическая значимость. Сформулирована теоретическая модель, которая имеет качественное согласование с результатами импульсных опытов. Показано, что существенное 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.

Практическая значимость. Полученные экспериментальные результаты демонстрируют перспективность использования двухкомпонентных смесей с нижней критической температурой растворения 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. Автором вводится понятие «не вполне устойчивого состояния», под которым понимается «состояния перегрева относительно линии равновесия жидкость-пар или линии равновесия жидкость-жидкость». Из приведенного определения непонятно отличие данного термина от общепринятого термина «метастабильное состояние».
2. В диссертации не представлены результаты расчета линии бинодали по теории Флори – Хаггинса и сравнение расчетов с экспериментом. Такое сравнение могло бы служить критерием применимости теории Флори – Хаггинса к описанию водного раствора полипропиленгликоля-425 и, следовательно, адекватности вычисленной спинодали.
3. В тексте диссертации приводится сравнение экспериментальной бинодали раствора вода/ППГ-425 с данными других авторов; наблюдается существенное отличие приведенных кривых (Рис. 4.1). Полученная в диссертационной работе кривая впоследствии используется в качестве референсной. Каковы основания полагать, что полученная автором диаграмма более точная?
4. Было бы полезным привести в тексте диссертации графики зависимости температуры спонтанного вскипания и температуры начала фазового разделения раствора по механизму жидкость-жидкость от концентрации и провести сопоставление данных кривых с бинодалью. Также полезно было бы представить указанные величины для двух экспериментальных режимов (при постоянном токе и постоянной мощности) и обсудить их различия.
5. Эффект плато на температурных кривых, полученных в ходе импульсного нагрева в режиме постоянной мощности, наблюдается только для составов с массовым содержанием ППГ-425 равным 20 и 30%. Данные составы лежат в окрестности концентрации нижней критической точки (около 27 %). В то же время, для состава 40 масс. % такого эффекта не наблюдается, хотя он приблизительно симметричен составу 20 масс. % относительно концентрации критической точки. Как можно объяснить этот эффект? Связано ли это с асимметрией относительного положения бинодали и спинодали, и, следовательно, асимметрии перегрева относительно критической концентрации?

Указанные замечания носят дискуссионный характер и не снижают общей положительной оценки работы.

Заключение.

Диссертационная работа Игольниковой 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 завершенную 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 физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории неупорядоченных систем отдела физической химии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук

 Рыльцев Роман Евгеньевич

Адрес: 620016, Россия, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101.
E-mail: rrylcev@mail.ru; Тел.: +7(343) 232-91-04.

Подпись Р.Е. Рыльцева заверяю Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института металлургии Уральского отделения Российской академии наук, кандидат химических наук



 Долматов Алексей Владимирович