

ОТЗЫВ

официального оппонента

Волкова Николая Борисовича на диссертацию Игольников А.А. «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. Тема диссертационной работы Игольникова А.А. – экспериментально-теоретическое исследование методами импульсного нагрева нестационарного теплообмена в бинарных растворах с нижней критической температурой растворения, несомненно, актуальна и связана, прежде всего, с поисками новых способов увеличения скорости теплообмена, имеющих важное научное и практическое значение для охлаждения микроустройств современной вычислительной и космической техники.

Выше сказанное позволяет сделать также вывод о полном соответствии темы диссертации Игольникова А.А. паспорту специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника в части пунктов 1, 2 и 8.

Содержание работы. Диссертация Игольникова А.А., объемом 115 страниц текста, состоит из введения; пяти глав, первые две из которых – обзорные; заключения; списка литературы из 96 наименований. Ознакомление с диссертацией позволяет утверждать, что сформулированные Игольниковым А.А. положения, выносимые на защиту, раскрыты и обоснованы, в основном, в 3-й, 4-й и 5-й главах диссертации. Ниже, по ходу анализа их основного содержания, мы выделяем наиболее значимые, на наш взгляд, результаты диссертанта.

Во введении обоснована *актуальность* темы диссертационной работы; сформулированы *цели и задачи*; показаны *научная новизна, достоверность полученных результатов, их научная и практическая значимость*, а также приведены *научные положения*, выносимые автором на защиту, и информация о *личном вкладе диссертанта и апробации* результатов работы.

Первая глава посвящена обзору механизмов теплообмена в двухкомпонентных растворах. Раздел 1.1 посвящен обзору основных понятий и определений, необходимых, по мнению автора диссертации, для изучения теплообмена в двухкомпонентных растворах. В разделе 1.2 обсуждаются проблемы, возникающие при рассмотрении фазового равновесия в двухкомпонентных растворах; а в разделе 1.3 – экспериментальные методы их исследования. В разделе 1.4 на основе литературных источников делается достаточно подробный обзор теплофизических свойств двухкомпонентных растворов с ограниченной областью смешения и методов их экспериментального исследования. Раздел 1.5 посвящен особенностям переноса теплоты двухкомпонентными смесями с ограниченной областью смешения компонентов, а в разделе 1.6 кратко обсуждаются понятия о частичном равновесии растворов с критической точкой растворения. В заключительном разделе 1.7 автор делает выводы, необходимые для выполнения целей диссертационной работы.

Глава 2, занимающая 17 страниц, посвящена обзору экспериментальных методов исследования теплофизических свойств жидкостей в не вполне устойчивых состояниях. В разделе 2.1 рассмотрены методы измерения температуры достижимого перегрева: метод всплывающей капли; метод адиабатического сброса давления; метод импульсного нагрева проволочного зонда. Раздел 2.2 посвящен обзору методов изучения свойств перегретых жидкостей: измерения удельного объема; изобарной теплоемкости; скорости распространения ультразвука; вязкости. В разделе 2.3 делаются выводы по главе 2 и формулируется цель диссертационной работы: «<...> получение нового знания о характеристиках переноса теплоты частично-смешивающимися двухкомпонентными системами в области не вполне

устойчивых и неустойчивых состояний, отвечающих перегреву относительно линии равновесия жидкость-пар или жидкость-жидкость и диффузионной спинодали при заданном давлении, соответственно».

Основные результаты диссертации получены автором в главах 3, 4 и 5.

Структура главы 3 строго следует описанию личного вклада диссертанта, приведенного в тексте введения диссертации и автореферата. В разделе 3.1 кратко описаны объекты исследования – двухкомпонентные смеси и их подготовка требуемого массового (мольного) состава. Раздел 3.2 посвящен подробному способу подготовки проволочного платинового нагревателя-термометра. В разделе 3.3 описано моделирование платинового зонда методом конечных элементов, а также получены распределения температуры по длине (рис. 3.3-3.4) и радиусу (рис. 3.5) зонда. В разделе 3.4 на основе блок-схемы экспериментальной установки Лаборатории быстропротекающих процессов и физики кипения Института теплофизики УрО РАН кратко описан метод управляемого импульсного нагрева проволочного зонда, принятого в качестве основного в научной группе, членом коллектива которой является диссертант. В этом же разделе приведены соотношения, принятые для расчета теплового потока, коэффициента теплоотдачи и теплового сопротивления. На рис. 3.7- 3.10 показаны результаты измерений, демонстрирующие адекватность используемой экспериментальной методики. На рис. 3.7 представлены первичные экспериментальные данные, полученные в режиме постоянной мощности (а) и режим постоянного тока (б). Рисунки 3.8-3.9 показывают средне взвешенную температуру проволочного зонда в де-ионизованной воде (рис. 3.8, режим постоянной мощности) и толуоле (рис. 3.9, режим постоянного тока). Рис. 3.10 показывает результаты, полученные в серии из 10 экспериментов в режиме постоянной мощности (а) и постоянного тока (б). В разделе 3.5 описана методика расчета погрешности измерений и рассчитаны значения относительной погрешности для каждой из используемых в работе физических величин (таблица 3.1). Содержание главы 3 и полученные в ней результаты свидетельствуют о высокой степени достоверности научных результатов, получаемых с помощью принятого в работе экспериментального метода.

В Главе 4 автором обсуждён весь массив полученных в работе экспериментальных результатов. В разделе 4.1 представлены определение параметров фазовой диаграммы водного раствора полипропиленгликоля-425 в координатах температура-концентрация, используемого в диссертационной работе в качестве объекта исследования по данным отдельного опыта. На рис. 4.1 показана экспериментально полученная бинодаль водного раствора ППГ-425 в сравнении с ранее полученными другими авторами данными. Значения нижней критической точки растворения, полученные автором, равны: $\omega_{cr} = 27$ масс.% ППГ-425, $T_{cr} = 50.2^\circ\text{C}$. Сравнение с литературными данными показывают, что значение критической концентрации близко значениям, полученным [Firman, R. and Kahlweit, M., 1986; Jorgensen, M.K., 2008], а значение нижней критической температуры растворения более близко к значению, полученным [Jorgensen, M.K., 2008], чем к [Firman, R. and Kahlweit, M., 1986]. Кроме того, по измеренным в данном разделе параметрам бинодали с использованием теории регулярных растворов и теории Флори-Хаггинса рассчитал параметры спинодали (рис. 4.2). В разделе 4.2 автором проведен анализ экспериментальных данных, полученных с помощью управляемого импульсного нагрева водного раствора ППГ-225 в режиме постоянного тока. Для выделения особенностей качественного поведения экспериментальных кривых, свидетельствующих в пользу появления признаков расслоения раствора по типу жидкость-жидкость, автором использовано их дифференцирование по времени. Результаты данного анализа приведены на рис. 4.3-4.9 для различных условий эксперимента. Раздел 4.3 содержит анализ экспериментов по импульсному нагреву водного раствора ППГ-425 в

режиме постоянной мощности. Автором установлено, что при значениях концентрации, существенно меньших критической ($\omega = 10$ масс.%) и больших критической ($\omega = 40; 50$ масс.%) результаты, полученные в режимах с постоянным током и с постоянной мощностью, аналогичны друг другу (рис. 4.10-4.12). Рис. 4.13 показывает формирование температурного плато на временах, больших 5 мс, при концентрации 20 масс.% с нормальным расположением температурных кривых для различных значений давлений (более интенсивному теплообмену соответствует большее давление) (а); при околкритическом значении концентрации, равным 30 масс.%, большим давлениям соответствует низкая интенсивность теплообмена. Дальнейший, подробный, анализ автором экспериментальных результатов относится к критическому водному раствору ППГ-425 с $\omega_{cr} = 27$ масс.% (рис. 4.14-4.21). Следует особо отметить результаты анализа экспериментов, приведенные на рис. 4.18-4.19 и в таблице 4.1, которые убедительно свидетельствуют об интенсификации теплообмена в неустойчивом (критическом и околкритическом) состоянии бинарного раствора с нижней критической точкой растворения. Заключают главу важные, по моему мнению, для теоретической интерпретации экспериментов результаты анализа, приведенные на рис. 4.20 и 4.21. Эти данные свидетельствуют о том, что: (1) кривые нагрева (рис. 4.20) и отношения теплового сопротивления околкритического водного раствора ППГ-425 к тепловому сопротивлению воды (рис. 4.21) на начальном участке длительностью около 2 мс совпадают, вне зависимости от давления; (2) на временах, больших 2 мс экспериментальная кривая нагрева околкритического водного раствора ППГ-425 выходит на плато с слабой зависимостью температуры проволочного зонда от времени.

Глава 5 посвящена построению теоретической модели и интерпретации в её рамках результатов проведенных экспериментов с нагревом в режиме постоянной мощности критического водного раствора ППГ-425. При построении теоретической модели автором использованы знания о росте капель за счет сил поверхностного натяжения в присутствии градиента температуры (качественная картина движения и роста капель жидкости представлена на рис. 5.1). В результате построена простая теоретическая модель, учитывающая главную нелинейность в уравнении теплопроводности, связанную с соотношением конвективного и диффузионного переноса тепла. В результате получено нелинейное уравнение для определения температуры проволочного зонда, которое учитывает конвективный и диффузионный теплообмен и позволяет сравнить результаты численного и реального экспериментов по нагреву критического водного раствора ППГ-425. Решение полученного автором уравнения в безразмерном виде зависит от безразмерного времени, равного фактически числу Фурье Fo , и двух безразмерных параметров, один из которых – безразмерное число Марангони, определяющее вклад конвективного теплообмена, а второй – вклад источника в нагрев проволочного зонда. Результаты моделирования представлены на рис. 5.2-5.6 для различных условий численного эксперимента. Сравнение с реальным физическим экспериментом, приведенное на рис. 5.3 показывает хорошее качественное согласие. Таким образом, утверждение автора, что интенсификация теплообмена в водном растворе полипропиленгликоля-425 в неустойчивом состоянии связано с превалированием конвективного теплообмена над диффузионным теплообменом из-за спиноподобного распада раствора по типу жидкость-жидкость, можно считать достаточно обоснованным.

В **Заключении** формулируются основные результаты диссертационной работы.

Автореферат включает необходимые сведения о диссертации Игольниковой А.А. и полностью соответствует её содержанию. Сама диссертационная работа структурирована, содержит требуемые формальные разделы, в достаточной степени иллюстрирована и дает полное представление о проведенных исследованиях и полученных результатах.

Научная новизна. 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 и размеров в широком диапазоне температур и давлений, вплоть до 800°C и 100 МПа, соответственно. Обнаружена пороговая интенсификация теплообмена, вызванная началом спинодального распада неустойчивой системы. Отмечен трехстадийный механизм фазового разделения.

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.

Теоретическая значимость. Сформулирована простая теоретическая модель, учитывающая главную нелинейность в уравнении теплопроводности, связанную с соотношением конвективного и диффузионного переноса тепла. Получено нелинейное уравнение для определения температуры проволочного зонда, которое учитывает конвективный и диффузионный теплообмен и позволяет сравнить результаты численного и реального экспериментов по нагреву критического водного раствора ППГ-425.

Достоверность полученных результатов хорошо обоснована тщательностью выбора используемых экспериментальных методик, а также расчетом погрешностей измерений. Следует, также, отметить, что личный вклад автора диссертации в проделанную работу не вызывает сомнения.

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

Публикации. Научные результаты диссертационной работы, опубликованные в 13 статьях, из них 12 в журналах, цитируемых международными базами данных, полностью отражают её содержание, а также достаточно полно апробированы на международных и российских научных конференциях.

По диссертационной работе Игольников А.А. можно сделать следующие замечания:

1. На с. 63 в расшифровке параметров A и B , входящих в формулу (3.8) допущена опечатка. Дважды для величин разной размерности использован один и тот же термин A (по размерности второй параметр должен быть B).
2. По моему мнению, экспериментальные точки, полученные автором для бинодали водного раствора ППГ-425 в координатах температура-концентрация, следовало бы вместо соединения точек прямыми линиями усреднить их, например, по методу наименьших квадратов. Это дало бы гладкую кривую.
3. Из текста диссертации и подписи к рисунку 5.2 непонятно чем определен выбор приведенных в подписи значений параметров A' и B' ? Это вопрос относится в первую очередь к A' , зависящему от неопределенных параметров раствора: диффузии, вязкости, степени пересыщения и производной по температуре от поверхностного натяжения.
4. В подписях к рис. 5.3-5.6 отсутствует информация об используемых в расчетах значений параметров A' и B' .

Сделанные замечания не снижают общее положительное впечатление о работе Игольников А.А. и не затрагивают содержание научных положений, выносимых на защиту.

Общее 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.

Представленный в диссертационной работе объем выполненных автором экспериментальных и теоретических исследований позволяет сделать вывод, что она является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена важная научно-техническая проблема.

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, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН), главный научный сотрудник лаборатории нелинейной динамики Волков Николай Борисович.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
(01.04.13 – физико-математические науки),
главный научный сотрудник
лаборатории нелинейной динамики ИЭФ УрО РАН
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106
8-(343)-267-86-60, nbv@iep.uran.ru

Н.Б. Волков

Подпись д.ф.-м.н. Н.Б. Волкова заверяю:

Ученый секретарь ИЭФ УрО РАН,
кандидат физико-математических наук
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106
8-(343)- 267-88-18, ss@iep.uran.ru

Е.Е. Кокорина

09 января 2022 г.

