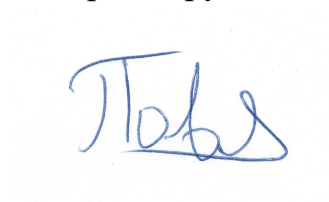


Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



**ПОВОЛОЦКИЙ Илья Ильич**

**ТЕПЛООТДАЧА К НЕИДЕАЛЬНЫМ РАСТВОРАМ В ПРОЦЕССАХ  
ИМПУЛЬСНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ**

1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2022

Работа выполнена в лаборатории быстропротекающих процессов и физики кипения ФГБУН Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор,  
**СКРИПОВ Павел Владимирович**

Официальные оппоненты: **НИЗОВЦЕВ Михаил Иванович**,  
доктор технических наук, ФГБУН Институт  
теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского  
отделения Российской академии наук, г.  
Новосибирск, заведующий лабораторией проблем  
энергосбережения;

**ЩЕКЛЕИН Сергей Евгеньевич**,  
доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО  
«Уральский федеральный университет имени  
первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
заведующий кафедрой атомных станций и  
возобновляемых источников энергии Уральского  
энергетического института;

**ЗАБИРОВ Арслан Русланович**, кандидат  
технических наук, ФГБОУ ВО «Национальный  
исследовательский университет «МЭИ», г.  
Москва, доцент кафедры инженерной  
теплофизики

Защита диссертации состоится «03» ноября 2022 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.08.18 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=3803>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Комаров Олег Вячеславович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Перед инженерной теплофизикой стоит ряд традиционных задач, обусловленных потребностями современной энергетики и других жизненно важных приложений, связанных с переносом теплоты. В этой связи, выяснение особенностей переноса теплоты в различных средах и поиск путей повышения эффективности теплопередающих устройств не потерял актуальности с пионерских работ Ньютона (1701), Био (1804) и Фурье (1807). Развитие микро- и нанометрических методов модифицирования теплоотдающей поверхности позволило расширить известную классификацию подходов к интенсификации теплоотдачи. Современная тенденция основывается на повышении интенсивности процессов при одновременном уменьшении размеров теплопередающих устройств.

В нашу сферу интересов входит исследование теплоотдачи к жидким растворам, в том числе, в области не вполне устойчивых состояний, кратковременно перегретых относительно температуры равновесия жидкость-пар  $T_s$  или жидкость-жидкость  $T_{ll}$  раствора при заданном давлении  $p$ . Перегретые состояния наблюдаются, как правило, в процессах с мощным локальным тепловыделением. Для таких процессов характерны малые масштабы времен и размеров, а осуществление теплоотдачи происходит за счет тепловой проводимости, как физически наиболее определенного механизма переноса теплоты. К специфическим чертам, свойственным растворам, можно отнести существенную глубину области перегретых состояний (в координатах  $T - p$ ), пониженную скорость роста паровой фазы, наличие дополнительного теплового сопротивления в режиме тепловой проводимости и усиление теплоотдачи к растворам с НКТР при углублении в область неустойчивых состояний, перегретых относительно температуры спинодали жидкость-жидкость. Последняя черта наблюдается как в стационарных, так и импульсных процессах. Обоснованный выбор раствора в качестве теплоносителя и «настройка» его состава под определенные условия процесса требуют систематического изучения свойств растворов в широкой области изменения параметров и поиска безразмерных координат, способствующих установлению термодинамического подобия растворов, включая растворы с верхней (ВКТР) и нижней критической температурой растворения (НКТР).

**Предметом** исследования является поиск взаимосвязи тепловой проводимости импульсно нагретого раствора и его избыточного объема при исходной температуре. Измерения плотности и расчет избыточного объема – хорошо отработанная процедура и не требует дорогостоящего оборудования. Исследование переноса теплоты растворами, особенно их теплопроводности, представляет собой серьезную экспериментальную задачу в виду необходимости максимального согласования условий эксперимента к требованиям расчетной модели. С учетом многообразия растворов, применяемых в технике, и сложности определения их теплофизических свойств, важно определить основание для быстрой оценки характерных особенностей тепловой проводимости при известных значениях избыточного объема.

**Степень разработанности темы исследования.** Данные по теплоотдаче к жидким растворам в не вполне устойчивых состояниях стали появляться только в последнее время, см. работы и библиографию в них. Это обстоятельство предопределило выбор темы данного исследования. Дополнительной мотивацией послужили полученные в опытах данные о появлении дополнительного теплового сопротивления в жидкости при добавлении в неё второго компонента. Наиболее последовательно они были обсуждены в работах Л.П. Филиппова и С.Н. Кравчуна. Сформулирована гипотеза об общности этого явления для растворов различной природы. Предположено, что источником дополнительного теплового сопротивления служит рассеяние фононов, обусловленное флуктуациями концентрации, а одним из главных факторов – величина избыточного объема, выраженная через соотношение плотности раствора и ее аддитивного значения. Авторы подтвердили свои выводы результатами опытов на растворах с близкими значениями теплопроводности компонентов. Значения теплопроводности растворов были измерены зондовым методом периодического нагрева, сущность которого состояла в регистрации колебаний температуры тонкой платиновой проволоки, нагреваемой переменным током в исследуемой среде. В силу ряда обстоятельств, эти опыты не были распространены на растворы с существенным отклонением от идеального закона, в том числе, на растворы с отрицательными значениями избыточного объема. За рамками исследования осталась область высоких (выше  $1 \text{ МВт/м}^2$ ) плотностей теплового потока и отвечающая ей область повышенных температур. В первую очередь, речь идет об областях не вполне устойчивых и неустойчивых состояний, недоступных стационарным методам измерения.

**Цель** данного исследования – получение нового знания о тепловой проводимости растворов с существенным отклонением свойств от идеального закона в широкой области изменения температуры, включая область не вполне устойчивых и неустойчивых состояний; проверка гипотезы Л.П. Филиппова на новом материале, основанном на первичных данных опыта.

**Задачи:**

разработка объективной методики обнаружения температуры равновесия жидкость-жидкость и определение линии равновесия растворов, для которых она не известна;

постановка опытов по управляемому импульсному нагреву зонда в сильно неидеальных растворах при сопоставимых условиях тепловыделения; параметрами послужат значения концентрации, давления и характерной температуры опытов; переменной, отслеживаемой в опыте – изменение мощности, необходимой для поддержания избранной температуры зонда в веществе в ходе измерительного импульса;

сопоставление тепловой проводимости растворов с большими (по модулю) значениями объема смешения в заявленной области изменения температуры, в том числе, с аддитивными значениями, рассчитанными по соответствующим значениям чистых компонентов.

Исходя из цели, **объектами** исследования служили существенно неидеальные растворы, имеющие избыточный объем  $v^E(x_{\max})$  от -2 до 6 см<sup>3</sup>/моль и соотношение плотностей компонентов  $\rho_1/\rho_2$  от 1,1 до 2,7, а именно, водные растворы полиэтиленгликолей (ПЭГ) и полипропиленгликолей (ППГ), растворы фторорганических жидкостей (ФОЖ) с предельными и непредельными углеводородами, а также исходные компоненты. Здесь переменная  $x_{\max}$  обозначает концентрацию, соответствующую наибольшему значению избыточного объема  $|v^E(x)|_{\max}$  раствора.

#### **Научная новизна:**

Разработана новая методика определения температуры равновесия жидкость-жидкость.

Выявлены характерные черты релаксации теплоотдачи от нагревателя-зонда, погруженного в бинарную жидкость, в масштабе малых времен ( $10^{-2}$  с) и размеров ( $10^{-5}$  м) при значительных ( $> 1$  МВт/м<sup>2</sup>) значениях плотности теплового потока.

Известные данные по дополнительному тепловому сопротивлению в растворах дополнены новым материалом, основанном на существенном расширении области изменения значений объема смешения ( $v^E > 0$  и  $v^E < 0$ ) и температуры, включая области не вполне устойчивых и неустойчивых состояний.

**Теоретическая значимость.** По результатам опытов сформулирована гипотеза о взаимосвязи объема смешения при исходной температуре раствора, то есть,  $v^E(T = T_0)$ , с величиной дополнительного теплового сопротивления импульсно перегретого раствора.

**Практическая ценность** данной работы обусловлена широким применением бинарных жидкостей, в том числе частично-смешиваемых систем, в технологических процессах с мощным тепловыделением. В общем случае, выбор теплоносителя «под задачу» требует знания тепловой проводимости растворов в полном диапазоне изменения составов и в достаточно широкой области изменения температуры и давления. Например, именно интенсивность теплоотдачи реакционно-способного раствора к стенке реактора является фактором, лимитирующим возможность масштабирования реагирующего объема вещества (объема реактора), а, значит, и повышения производительности энергоемкого технологического оборудования. Полученные в работе данные создают практическую основу для осуществления масштабирования и, в перспективе, позволяют выявить условия осуществимости флэш-синтеза с повышением температуры раствора для сокращения продолжительности реакции.

**Методология и методы исследования.** Для изучения теплоотдачи к импульсно перегретым растворам был применен метод температурного плато, разработанный в нашей исследовательской группе, см. работу и библиографию в ней. В его основу положен принцип электронного управления мощностью импульсного тепловыделения в нагревателе. Суть метода состоит в создании кратковременных квазиизотермических условий для проволочного зонда –

термометра сопротивления, нагретого до избранного значения температуры. Выбор данной тепловой моды обусловлен наличием строгой «привязки» температуры зонда в ходе опыта. Важно, что значение температуры может выбираться как в области устойчивых, так и в области не вполне устойчивых состояний.

**Положения, выносимые на защиту:**

- 1) Факт измеримости теплофизических свойств растворов, перегретых относительно линии равновесия жидкость-жидкость и/или жидкость-пар, в масштабе малых характерных времен и размеров;
- 2) Результаты импульсных измерений интенсивности теплообмена зонда с раствором в широкой области изменения температуры, включая область не вполне устойчивых и неустойчивых состояний;
- 3) Экспериментальное подтверждение о справедливости гипотезы Л.П. Филиппова для растворов с существенным отклонением свойств от идеального закона в широкой области изменения температуры.

**Личный вклад автора** заключается в разработке методики определения фазовой диаграммы растворов с ВКТР, проведении экспериментальных измерений и расчётов коэффициентов теплоотдачи растворов, сопоставление полученных величин дополнительного теплового сопротивления растворов, обобщение и анализ результатов исследований.

**Достоверность результатов** подтверждается применением методов теплофизических измерений, основанных на анализе первичных данных и учете погрешности измерений, повторяемостью результатов в серии измерений при заданных параметрах и их чувствительностью к малым изменениям теплофизических свойств вещества, опытом работы с перегретыми жидкостями и опорой на фундаментальные законы теплообмена.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на российских и международных конференциях, среди которых: Сибирский теплофизический семинар – СТС, Новосибирск (2020, 2021); Всероссийская школа - семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества – СПФКС, Екатеринбург (2015 – 2021); Российская конференция по теплофизическим свойствам веществ, Москва (2018); Международная молодежная научная конференция «Физика. Технологии. Инновации.», Екатеринбург (2016, 2018, 2021); Всероссийская междисциплинарная молодежная научная конференция «Информационная школа молодого ученого», Екатеринбург (2017 – 2021); International Conference on Equations of State for Matter, Эльбрус (2017, 2020 – 2022); Международная научно-техническая конференция по авиационным двигателям, Москва (2020) и др. Лично диссертантом было сделано 18 докладов.

**Реализация результатов работы.** Результаты работы использовались для восполнения отсутствующей информации по теплофизическому аспекту синтеза противотурбулентных присадок для нефтепроводов компанией Nika PetroTech. Знание теплофизических свойств реакционно-способной смеси и тенденции их изменения в ходе реакции является ключевым условием осуществимости технологического процесса. Действительно, предложенный в работе способ

мониторинга расслаивающихся растворов в непрозрачных сосудах позволяет выявить предпосылки фазового перехода и избежать аварийной остановки процесса синтеза.

#### **Соответствие паспорту специальности**

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника в области технических наук в части пунктов:

1) Экспериментальные исследования термодинамических и переносных свойств чистых веществ и их смесей в широкой области параметров состояния.

4) Экспериментальные и теоретические исследования процессов взаимодействия интенсивных потоков энергии с веществом.

6) Экспериментальные исследования, физическое и численное моделирование процессов переноса массы, импульса и энергии в многофазных системах и при фазовых превращениях.

8) Разработка научных основ и создание методов интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты.

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в 25 печатных работах, из них 7 статей, опубликованных в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, включая 5 статей, индексируемых в базе данных Scopus.

#### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, насчитывающего 117 наименований, списка сокращений и условных обозначений, приложения. Работа изложена на 102 страницах, содержит 112 рисунков.

Основные результаты получены автором в рамках выполнения работ по проекту РФФИ №19-38-90075 «Тепловая проводимость импульсно перегретых бинарных растворов». Частичная финансовая поддержка исследования осуществлена в рамках проектов РФФИ №16-08-00381, РФФИ №18-38-00206 и РНФ №19-19-00115 в 2016 – 2022 годах.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, отражена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные защищаемые положения.

В **первой главе** представлен аналитический обзор некоторых сведений о теплофизических свойствах растворов. В частности рассмотрены условия фазового равновесия в бинарных растворах и виды линий фазового равновесия жидкость-жидкость. Проанализирована связь между объёмом смешения и типом критической точки на фазовой диаграмме раствора. Далее рассмотрена фазовая диаграмма в координатах  $T$ - $p$  и представлены способы перевода вещества в

перегретое и сверхкритическое состояние. Объяснено преимущество используемого в работе способа изобарного импульсного нагрева вещества.

Рассмотрены свойства неидеальных растворов, такие, как теплоёмкость и теплопроводность в окрестности критической точки растворения и в полной области концентраций растворов. Обсуждены причины появления аномалий в критической области жидкость-жидкость. Обсуждены опыты и гипотеза Л.П. Филиппова о появлении дополнительного теплового сопротивления в жидких растворах. Рассмотрен теплофизический аспект методики синтеза противотурбулентных присадок для нефтепроводов. В настоящее время, главным образом, используются присадки суспензионного типа. В них твёрдый полимер диспергирован в жидкой среде нерастворителя. Для получения полимера с заданными свойствами необходимо создать оптимальные условия для полимеризации: температура, концентрация мономера, концентрация катализатора и т.д., сохранив технологичность процесса. А для этого, в свою очередь, необходимо провести исследования фазовых равновесий жидкость-жидкость двойных и тройных смесей перфторированных алканов и терминальных олефинов. Эти работы позволят найти наиболее подходящие системы и температурные условия (Рисунок 1) для получения полимерной суспензии с требуемыми свойствами. Рассмотрена методика флэш-синтеза, как один из вариантов усовершенствования существующей методики.

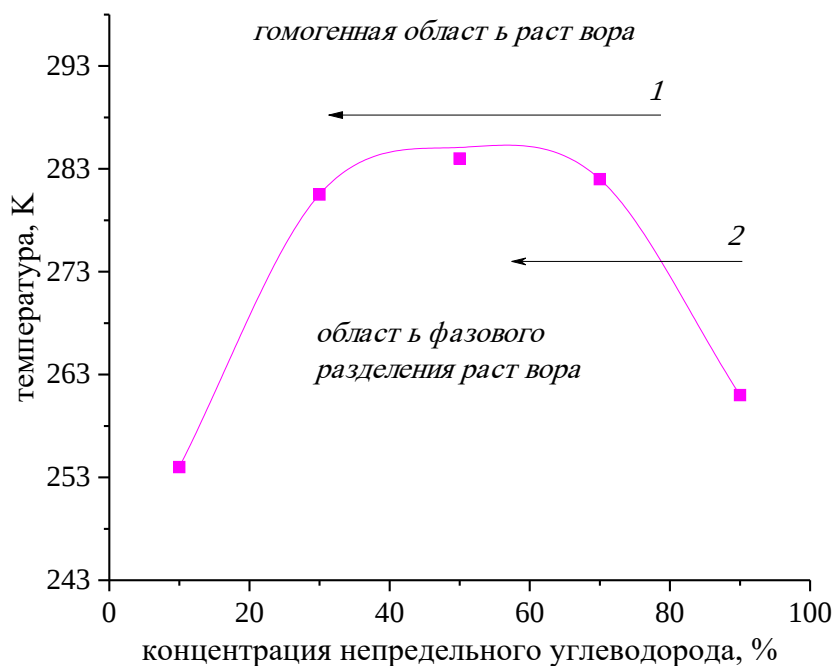


Рисунок 1 – Процесс уменьшения концентрации непредельного углеводорода во время синтеза присадок. 1 – штатный процесс синтеза присадок; 2 – процесс синтеза с заходом в область фазового разделения раствора и аварийной остановкой синтеза.

В постановке задачи обозначена сфера интересов данной работы. В нее входит получение нового знания о тепловой проводимости растворов с существенным отклонением свойств от идеального закона в широкой области изменения температуры. Наиболее амбициозная задача состоит в вовлечении в исследование области не вполне устойчивых и неустойчивых состояний,

кратковременно перегретых относительно температуры равновесия жидкость-пар или жидкость-жидкость раствора, а также температуры спинодали жидкость-жидкость при заданном давлении, соответственно. Важная задача состоит в проверке гипотезы Л.П. Филиппова на новом материале, основанном на первичных данных опыта. Речь идет о вовлечении в исследование растворов с существенными значениями избыточного объема, в том числе, с отрицательными значениями, а также высоких (около  $1 \text{ МВт/м}^2$ ) плотностей теплового потока и отвечающей им области повышенных температур. Так, например, именно интенсивность теплообмена реакционно-способного раствора со стенкой реактора является фактором, лимитирующим возможность масштабирования реагирующего объема вещества (объема реактора), а, значит, и повышения производительности энергоемкого технологического оборудования. В ходе реакции содержание одного из компонентов уменьшается (в нашем случае, непредельного углеводорода). Данное обстоятельство приводит к двум важным требованиям. Речь идет о необходимости знания зависимостей тепловой проводимости и температуры на линии ВКТР от состава раствора. Второе требование является принципиально важным, поскольку пересечение линии ВКТР, вогнутой к оси составов, в ходе реакции приведет к фазовому разделению исходно однородного раствора на две жидкие фазы и вынужденной остановке агрегата.

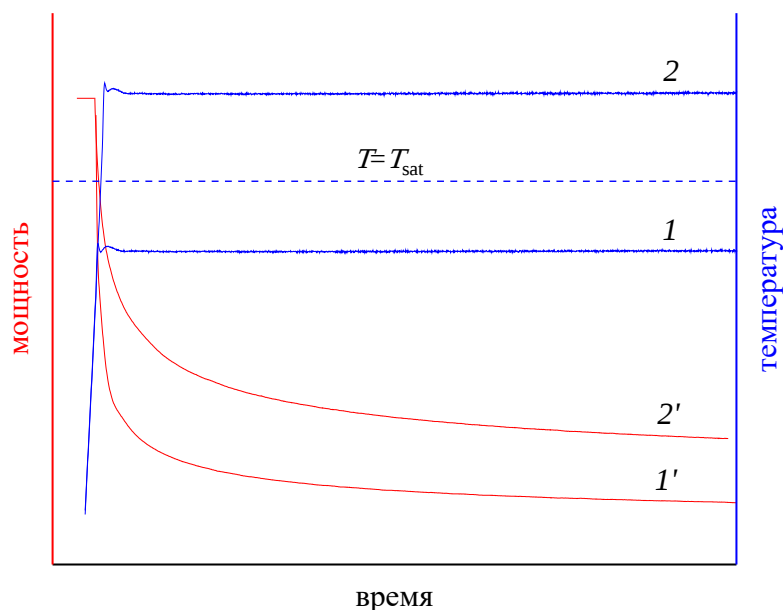


Рисунок 2 – Схема опыта по методу температурного плато.  $T_s$  – температура равновесия жидкость-пар вещества. 1 – экспериментальная кривая температуры термостабилизации зонда в области устойчивых состояний ( $T_{st1}$ ); 2 – экспериментальная кривая температуры термостабилизации зонда в области перегретых состояний ( $T_{st2}$ ). Кривые 1' и 2' – значения электрической мощности, требуемые для термостабилизации зонда при заданной температуре.

Во второй главе описана процедура подготовки образцов и измерительного зонда. Рассмотрен метод температурного плато, выбранный нами для решения поставленной задачи. Он позволяет проводить измерение теплоотдачи как в

области абсолютно устойчивых состояний, так и в области не вполне устойчивых (перегретых) состояний. Данный метод предусматривает стабилизацию средней температуры зонда, импульсно нагреваемого в веществе, на заданном отрезке времени. Стабилизируемым параметром является термозависимое сопротивление зонда и, следовательно, его температура. Суть режима состоит в создании кратковременных квазиизотермических условий для зонда – термометра сопротивления, нагретого до избранного значения температуры  $T = T_{st}$  (Рисунок 2). В опыте измеряются значения падения напряжения на зонде и на образцовом («токовом») резисторе во времени. Из экспериментальных значений тока в цепи зонда и падения напряжения на образцовом резисторе рассчитывается значение электрической мощности, необходимой для термостабилизации зонда в веществе. По первичным данным, с привлечением градуировки платиновых термометров, рассчитывается среднеинтегральное значение температуры зонда  $T_{st}$ . Далее рассчитывается средняя (по поверхности зонда) плотность теплового потока через поверхность зонда и коэффициент теплоотдачи  $K_T(t)$ , как основная переменная в опытах с мощным тепловыделением, при заданном температурном напоре  $\Delta T = T_{st} - T_0$ :

$$K_T(t) = [P(t) - P_{vac}(t)] / (\Delta T \cdot S_w), \quad (1)$$

где  $S_w$  – площадь поверхности зонда,  $P_{vac}(t)$  – тепловыделение в зонде при разрежении в 660 Па, моделирующем условия вакуума. Повторяемость данных опыта в серии измерений и их чувствительность к малым изменениям свойств жидкости сделали обоснованным переход к относительному варианту измерений. Процедура перехода описана на странице 13, пункт 4.

На Рисунке 3 приведена принципиальная схема измерительной установки.

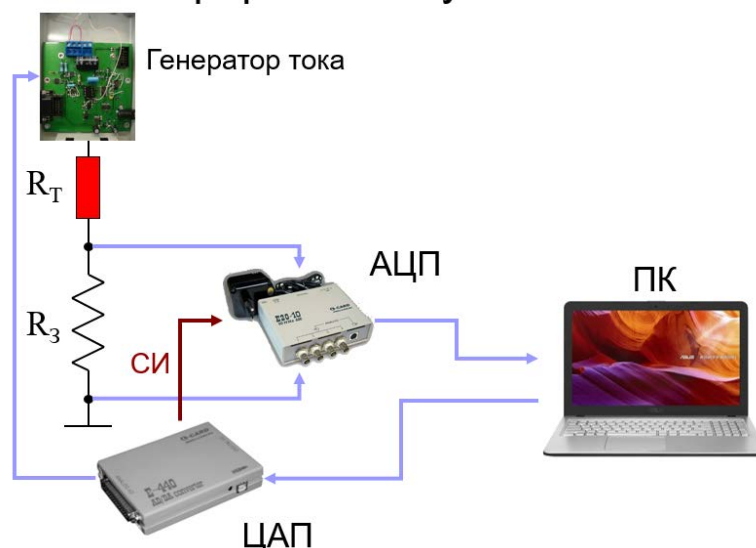


Рисунок 3 – Установка импульсного нагрева с произвольной формой импульса: полумостовая схема.  $R_T$  – токоизмерительное сопротивление,  $R_3$  – термозависимое сопротивление проволочного нагревателя (платиновый зонд), АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь, ПК – персональный компьютер со встроенным управляющим микроконтроллером.

Также рассмотрен метод двухимпульсного нагрева, который подразумевает чередования интервалов быстрого и медленного нагрева зонда до заданной

температуры для увеличения времени пребывания жидкости в перегретом состоянии и повышения чувствительности к малым изменениям свойств исследуемой среды. Метод двухимпульсного нагрева имеет высокий потенциал автоматизации измерений, что позволяет собрать автономные установки контроля состояния критически важных свойств технологических сред в режиме реального времени. В данной работе методика адаптирована для контроля фазового состояния растворов. Кроме того, описана визуальная методика определения фазовой диаграммы растворов. В этой же главе проведена оценка основных неопределенностей измерений.

В третьей главе представлены результаты, состоящие в том, что подтверждено существование дополнительного теплового сопротивления в растворах на новом экспериментальном материале, обобщающем данные для растворов с широкой областью изменения значений объема смешения, температуры и давления. В ходе работы было исследовано 93 образца водных растворов, имеющих отрицательный объем смешения, и 35 образцов растворов ФОЖ/углеводород, имеющих положительный объем смешения. Общее количество составило 128 образцов. В работе применены сокращения: этиленгликоль – МЭГ; диэтиленгликоль – ДЭГ; триэтиленгликоль – ТЭГ; пропиленгликоль – МПГ; дипропиленгликоль – ДПГ; трипропиленгликоль – ТПГ; полиэтиленгликоль 200 – ПЭГ-200; полиэтиленгликоль 400 – ПЭГ-400; полиэтиленгликоль 600 – ПЭГ-600; полипропиленгликоль 425 – ППГ-425; полипропиленгликоль 725 – ППГ-725; октофторбутилдигидрат – ОФБДГ; перфтороктан – ПФО; перфторметил-циклогексан – ПФМЦГ; перфтор-1,3-диметилциклогексан – ПФДМЦГ.

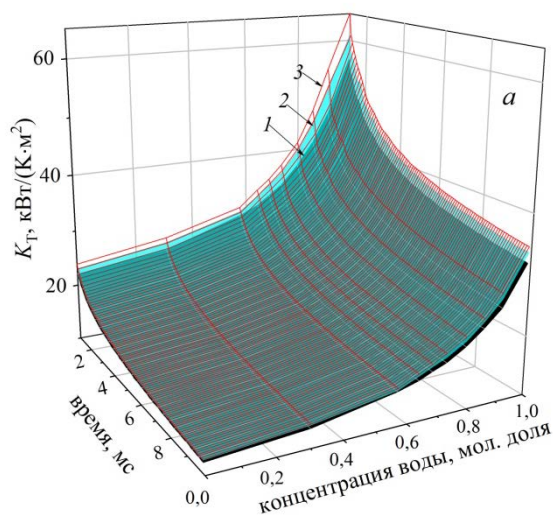


Рисунок 4а – Зависимость коэффициента теплоотдачи  $K_T$  водного раствора МПГ от времени и содержания воды. Параметром служит значение  $T_{st}$ , К: 1 – 363; 2 – 393 К; 3 – 423 К. Давление атмосферное.

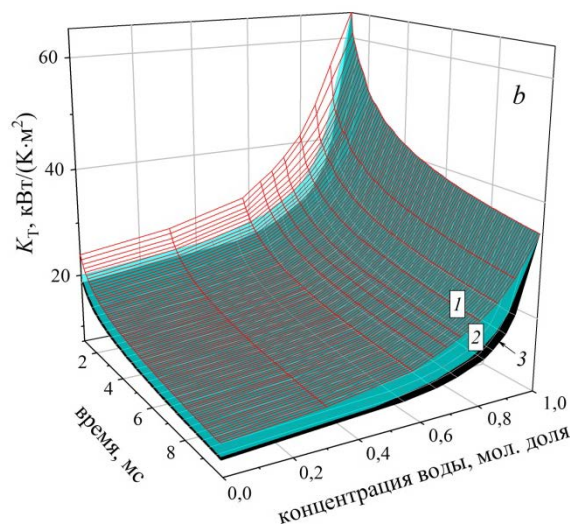


Рисунок 4б – Зависимость коэффициента теплоотдачи  $K_T$  водных растворов МПГ (1), ДПГ (2) и ТПГ (3) от времени и содержания воды при температуре  $T_{st} = 423$  К. Давление атмосферное.

Отметим еще несколько общих для исследованных растворов результатов:

1. Вдоль гомологического ряда отклонение относительно аддитивного закона имеет нарастающий характер (Рисунок 4b). Его значение систематически возрастает при увеличении количества звеньев в молекулярной цепи. Оно слабо зависит как от давления, так и от температуры термостабилизации (Рисунок 4a). Действительно, повышение значения  $T_{st}$  от 363 К до 423 К, при длительности импульса в 10 мс, сопровождается изменением тепловой проводимости в пределах единиц процентов.

2. Форма сигналов-откликов на импульсный нагрев сохраняет вид, характерный для переноса теплоты за счет механизма тепловой проводимости. Характерный вид сохраняется и при заходе за линию равновесия жидкость-пар, а также за спинодаль жидкость-жидкость в растворах с НКТР. Полученный результат дает возможность сопоставлять тепловую проводимость растворов в не вполне устойчивых и неустойчивых (за спинодалью) состояниях, вплоть до появления признаков распада таких состояний. Сам момент распада зависит от глубины и продолжительности захода в область перегретых состояний и отмечается характерным сигналом о спонтанном вскипании или спинодальном распаде. Сигнал отмечает пороговое изменение теплового потока в вещество. В качестве примера, на Рисунке 5 показаны результаты опытов с водным раствором ППГ-425, перегретым относительно спинодали жидкость-жидкость.

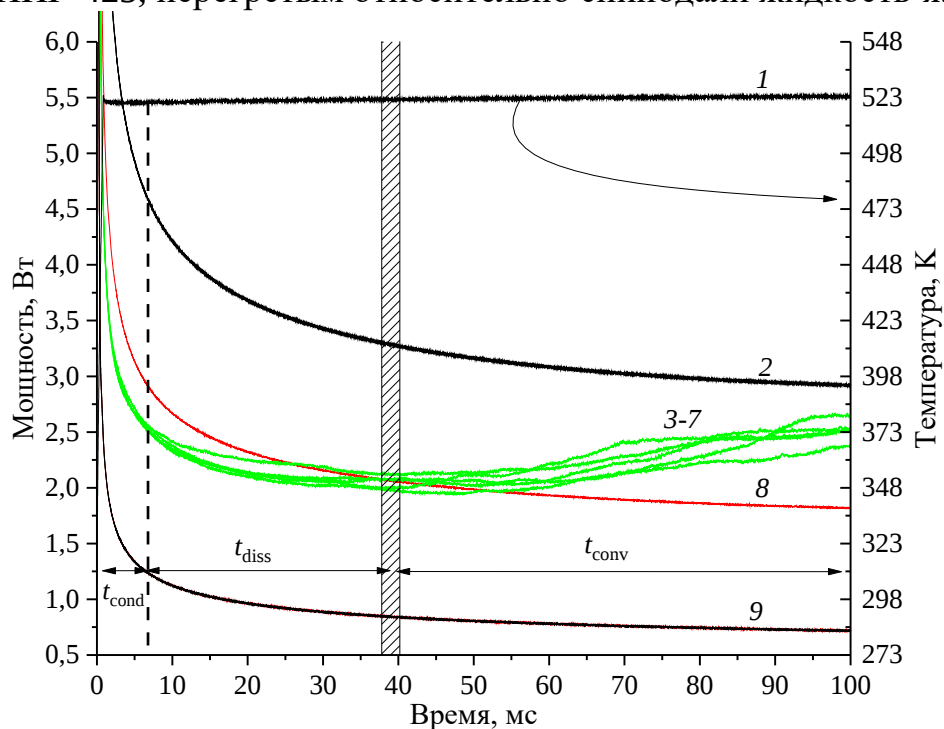


Рисунок 5 – Мощность тепловыделения в зонде, необходимая для поддержания заданного значения  $T_{st}$  (кривая 1, перегрев относительно спинодали жидкость-жидкость составляет 190 К) в водном растворе PPG-425 и его исходных компонентах. 2- мощность требуемая для термостабилизации зонда в воде; 3-7 – мощности требуемые для термостабилизации зонда в 50% растворе; 8- аддитивное значение мощности; 9- мощность требуемая для термостабилизации зонда в PPG-425. Обозначения  $t_{cond}$  – участок кондуктивного теплообмена;  $t_{diss}$  – участок микрофазового расслоения;  $t_{conv}$  – участок конвективного теплообмена.

В случае исходных компонентов подобных эффектов не наблюдалось.

3. Наблюдаемое резкое повышение плотности теплового потока свойственно спинодальному распаду. Действительно, спинодальный распад инициирует движение жидкости и является естественным релаксационным механизмом в данной области фазовой диаграммы раствора ( $p > p_c$ ,  $T_{st} > T_{ll}$ ). Его характерными чертами служит превышение значений мощности тепловыделения в зонде в 2 – 3 раза по сравнению с аддитивной величиной (Рисунок 6).

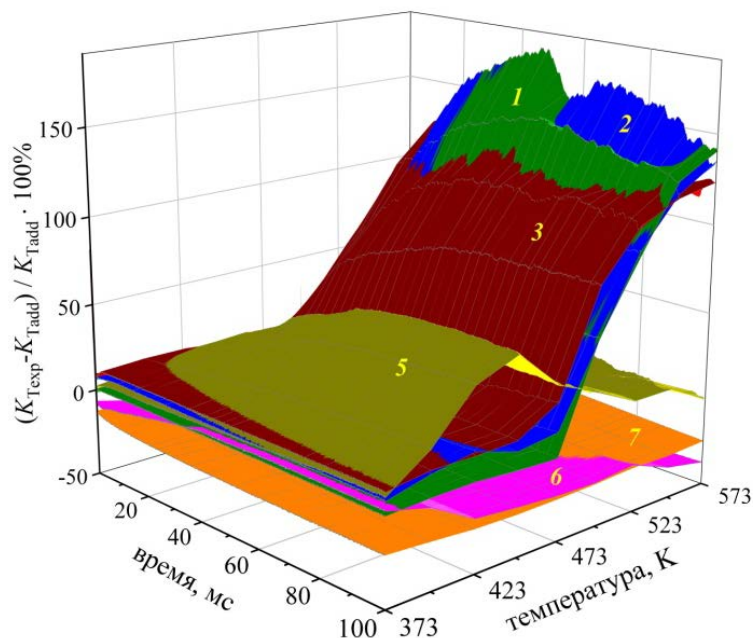


Рисунок 6 – Зависимость разности экспериментального и аддитивного значения коэффициента теплоотдачи водного раствора PPG-425 от времени и температуры термостабилизации. Параметром служит концентрация PPG-425, масс. %: 1–10; 2–20; 3–30; 4–0; 5–40; 6–50; 7–70; 8–100. Давление 32 МПа.

4. Итак, факт дополнительного теплового сопротивления в растворах следует непосредственно из сопоставления первичных данных импульсного опыта. Для определения его количественного значения и поиска взаимосвязи с объемом смешения раствора тепловая проводимость переводилась, в соответствии с соотношением  $\Delta \dot{K}_T(t) = [K_{Tadd}(t) - K_T(t)] / K_{Teq}(t)$  в безразмерный вид. В данном выражении индексы add и eq относятся к аддитивному и эквимолярному значениям, соответственно.

5. Обобщение данных по  $\Delta \dot{K}_T(t)$  исследованных растворов показало несущественность выбора момента интервала времени  $t_1 \div t_2$  для сопоставления концентрационных зависимостей приведенной тепловой проводимости  $\Delta \dot{K}_T(t)$  при заданном значении  $T_{st}$ , см., в качестве примера (Рисунок 7). Этот результат позволит сократить, в ходе развития исследования, продолжительность измерительного импульса (при соответствующем повышении верхней границы по  $T_{st}$ ) без ущерба для качества получаемых данных.

6. Главный результат состоит в том, что дополнительное сопротивление в растворах получило количественное выражение. Характерные зависимости безразмерной тепловой проводимости от концентрации  $\Delta \dot{K}_T(x)$

выбранных нами классов растворов в изученном интервале значений  $T_{st}$  приведены на Рисунках 7 – 9.

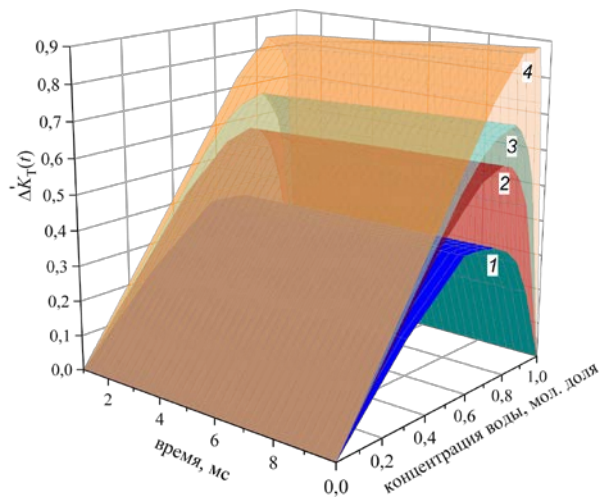


Рисунок 7 – Концентрационные зависимости приведенного коэффициента теплоотдачи  $\Delta\dot{K}_T(t)$  водных растворов пропиленгликолей в зависимости от длительности термостабилизации при  $T_{st} = 423$  К: 1- МПГ; 2- ДПГ; 3- ТПГ; 4- РРГ-425.

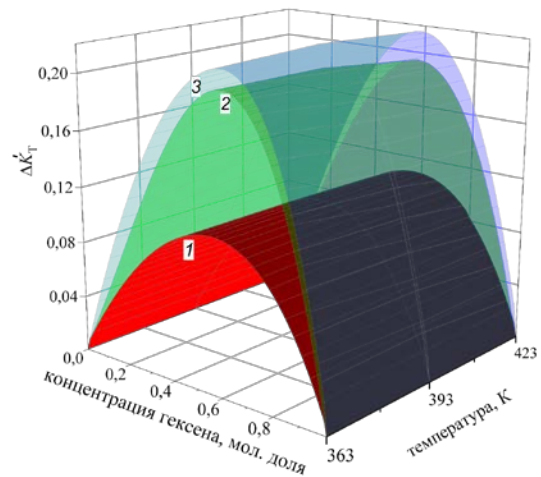


Рисунок 8 – Сглаженная зависимость приведенного коэффициента тепловой проводимости растворов  $\Delta\dot{K}_T$  в зависимости от температуры  $T_{st}$  и содержания гексена для трех растворов на основе гексена: 1 – ПФДМЦГ; 2 – ПФМЦГ; 3 – ОФБДГ. Давление 10 МПа.

7. Осуществлена проверка гипотезы о появлении дополнительного теплового сопротивления в растворах на новом экспериментальном материале. Для этого выполнено обобщение результатов опытов в координатах  $\Delta\dot{K}_T - v^E$ ; как наиболее представительный вариант обобщения; значение безразмерной тепловой проводимости определялось при концентрации, отвечающей максимальному значению объема смешения,  $\Delta\dot{K}_T(x_{\max})$ .

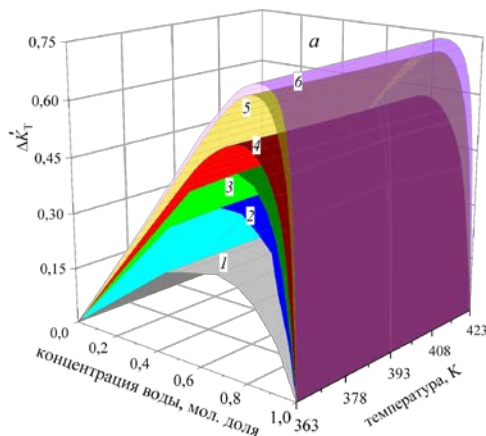


Рисунок 9a – Сглаженная зависимость приведенного коэффициента теплоотдачи водных растворов  $\Delta\dot{K}_T$  в зависимости от температуры  $T_{st}$  и содержания воды в растворах: 1 – МЭГ; 2 – ДЭГ; 3 – ТЭГ; 4 – ПЭГ-200; 5 – ПЭГ-400; 6 – ПЭГ-600. Давление атмосферное.

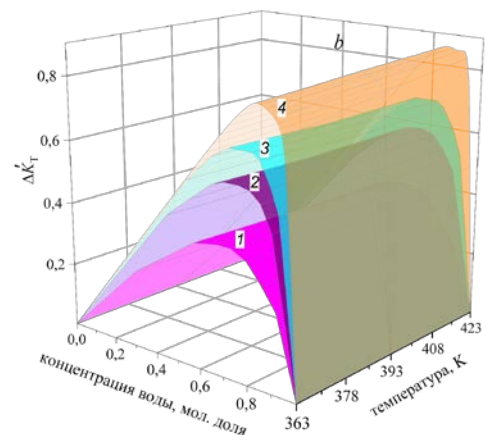


Рисунок 9b – Сглаженная зависимость приведенного коэффициента теплоотдачи водных растворов  $\Delta\dot{K}_T$  в зависимости от температуры  $T_{st}$  и содержания воды в растворах: 1 – МПГ; 2 – ДПГ; 3 – ТПГ и 4 – ППГ-425. Давление атмосферное.

В качестве примера, исходные для поиска искомой взаимосвязи графики водных растворов ДЭГ и ТЭГ при наибольшей температуре опыта  $T_{st}$  приведены на Рисунке 10. В ходе выполнения процедуры были выявлены следующие черты, общие для исследуемых растворов. Зависимость  $|v^E(x)|_{\max}$  в гомологическом ряду оказалась близка к линейной. Увеличение молекулярной массы вещества, как в гомологическом ряду, так и при переходе к веществам с более сложным строением, сопровождается увеличением значения  $|v^E(x)|_{\max}$  и соответствующего ему значения мольной доли воды или гексена.

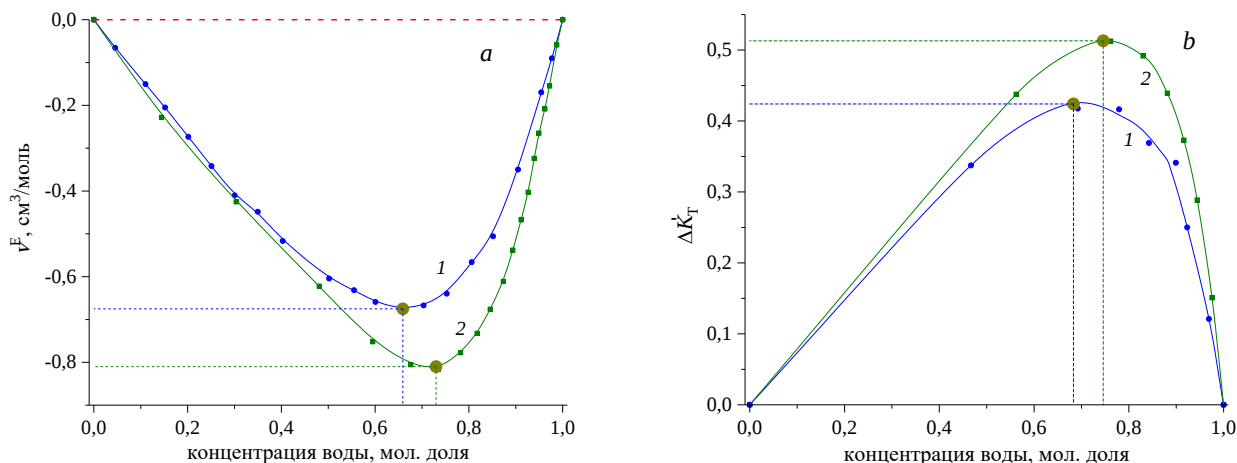


Рисунок 10 – Избыточный объем водных растворов ДЭГ (1) и ТЭГ (2) в зависимости от содержания воды при  $T_0 = 303$  К (рис. 10a) и приведенный коэффициент теплоотдачи этих же растворов в зависимости от содержания воды при  $T_{st} = 423$  К (рис. 10b).

8. Обобщение результатов опытов в координатах  $\Delta\dot{K}_T - v^E$  показало, что для всех исследованных растворов, во всем диапазоне концентраций наблюдается ухудшение тепловой проводимости растворов относительно аддитивных значений. Неожиданность состоит в том, что данное утверждение оказалось верным вне зависимости от знака объема смешения ( $v^E > 0$  или  $v^E < 0$ ). Вторая неожиданность состоит в том, что зависимость  $\Delta\dot{K}_T(|v^E|)$  имеет вид, близкий к линейному закону. Несмотря на стремление к максимально возможному расширению интервала значений  $v^E(x \sim 0 \div 1)$ , эта зависимость не проявила устойчивой тенденции к выходу «на насыщение». В качестве примера, зависимость  $\Delta\dot{K}_T(v^E_{\max})$  при температуре  $T_{st}(t) = 423$  К для составов растворов, отвечающих экстремумам объема смешения ( $v^E_{\min}$  для водных растворов гликолей и  $v^E_{\max}$  для фторированных растворов, соответственно) приведена на Рисунке 11. Данные импульсных опытов дополнены фрагментом известных результатов по приведенной теплопроводности растворов, точки 16, 17, 19–23.

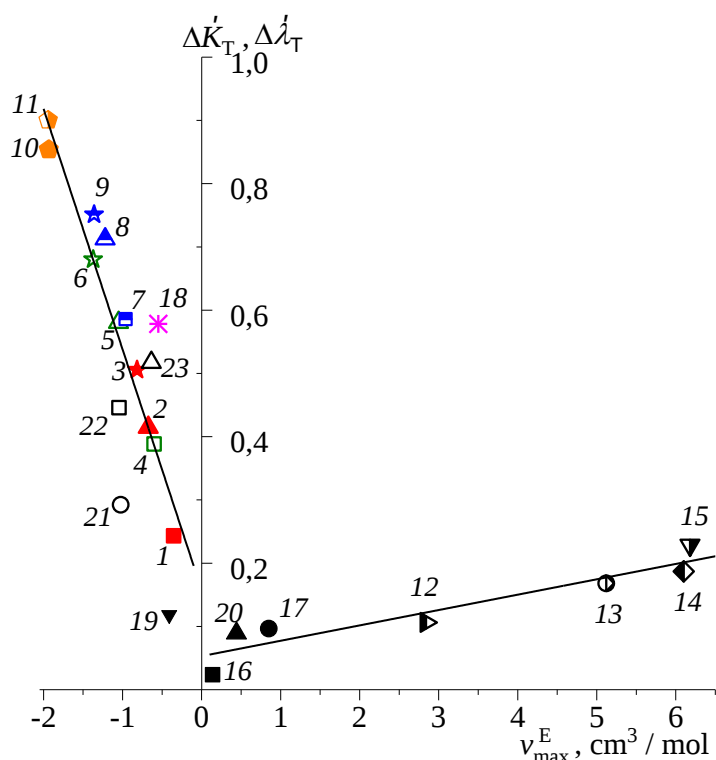


Рисунок 11 – Значения максимумов отклонения концентрационной зависимости приведенного коэффициента теплоотдачи при температуре  $T_{\text{ст}}(t) = 423 \text{ K}$  и приведенной теплопроводности  $\Delta \lambda'_T = (\lambda_{\text{ад}} - \lambda_{\text{exp}}) / [0.5 \cdot (\lambda_1 + \lambda_2)]$  растворов при температуре  $298 \text{ K}$  в зависимости от максимумов их избыточных объемов при температуре  $T_0 = 303 \text{ K}$ : 1 – МЭГ; 2 – ДЭГ; 3 – ТЭГ; 4 – МПГ; 5 – ДПГ; 6 – ТПГ; 7 – ПЭГ-200; 8 – ПЭГ-400; 9 – ПЭГ-600; 10 – ППГ-425; 11 – ППГ-725; 12 – ОФБДГ/гексен; 13 – ПФО/*n*-гексан; 14 – ПФМЦГ/гексен; 15 – ПФДМЦГ/гексен; 16 – гексан/циклогексан ( $295 \text{ K}$ ); 17 – гексан/перфторбензол ( $295 \text{ K}$ ); 18 – МБЭЭГ/вода; 19 – гексанол/гексан; 20 – этанол/гексан; 21 – метанол/вода; 22 – этанол/вода; 23 – 1-пропанол/вода.

Как следует из этого рисунка и приведенного выше обсуждения, с ростом объема смешения (по модулю) наблюдается повышение дополнительного теплового сопротивления в растворах. Оно имеет близкий к линейному характер относительно изменения абсолютного значения объема смешения.

9. При анализе Рисунка 11, выявилось обстоятельство, затрудняющее его восприятие. Оно обусловлено содержанием общепринятого определения объема смешения, по сути, маскирующим знак изменения плотности раствора с концентрацией относительно ее аддитивного значения. Речь идет о том, что наличия данных по объему смешения недостаточно, чтобы сделать вывод об увеличении или уменьшении плотности упаковки раствора, влияющей на длину свободного пробега фонона. В этой связи, данные, представленные на Рисунке 11, были перестроены в полностью безразмерных координатах (Рисунок 12). Обнаружено, что зависимость приведенного коэффициента теплоотдачи от приведенной разности аддитивного и экспериментального значения плотности также имеет линейную зависимость.

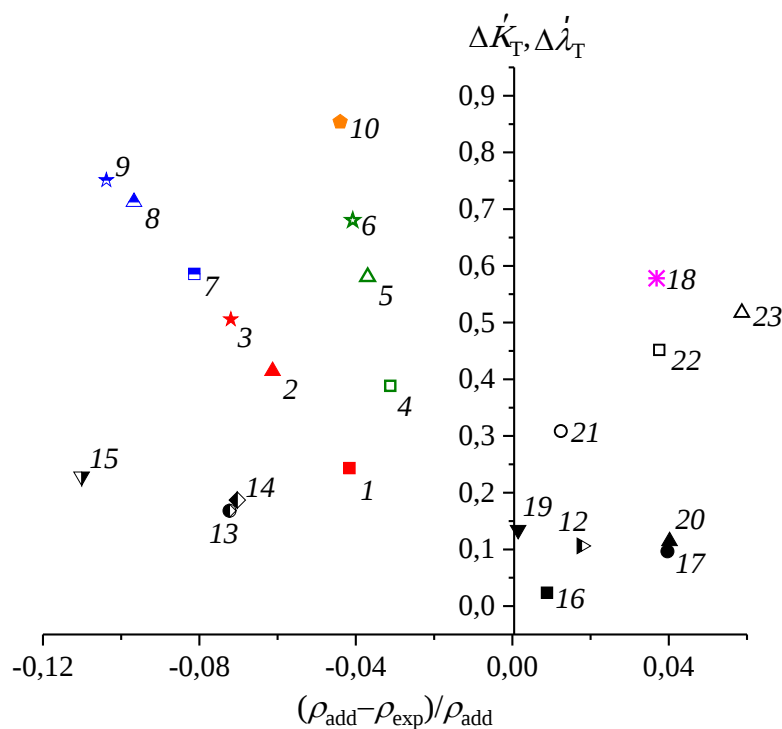


Рисунок 12 – Значения максимумов отклонения концентрационной зависимости приведенного коэффициента теплоотдачи при температуре  $T_{\text{ст}}(t) = 423 \text{ K}$  в зависимости от приведенной разности плотностей раствора при соответствующей концентрации. 1 – МЭГ; 2 – ДЭГ; 3 – ТЭГ; 4 – МПГ; 5 – ДПГ; 6 – ТПГ; 7 – ПЭГ-200; 8 – ПЭГ-400; 9 – ПЭГ-600; 10 – ППГ-425; 12 – ОФБДГ/гексен; 13 – ПФО/*n*-гексан; 14 – ПФМЦГ/гексен; 15 – ПФДМЦГ/гексен; 16 – гексан/циклогексан (295 K); 17 – гексан/перфторбензол (295 K); 18 – МБЭЭГ/вода; 19 – гексанол/гексан; 20 – этанол/гексан; 21 – метанол/вода; 22 – этанол/вода; 23 – 1-пропанол/вода.

Причём прослеживается разбиение на отдельные группы линейных зависимостей, связанных с определенным классом растворов.

10. Отметим результат, свидетельствующий о несущественности зависимости приведенной тепловой проводимости  $\Delta \dot{K}_T$  от температуры в опыте или температурного напора  $T_{\text{ст}} - T_0$ . Данный результат, наряду с выявленным подобием сигналов-откликов при повышении температуры  $T_{\text{ст}}$ , косвенно указывает на объем смешения при исходной температуре раствора, то есть,  $v^E(T = T_0)$ , как на ключевой фактор для значения теплоотдачи к импульсно перегретому раствору  $\Delta \dot{K}_T(T_{\text{ст}})$ . Если это действительно так, то о величине дополнительного теплового сопротивления импульсно перегретого раствора можно предварительно судить по данным для  $v^E(T = T_0)$ , которые находятся стандартными методами и не требуют дорогостоящего оборудования. Проверка этой гипотезы потребует постановки опытов со специально подобранным раствором, значения  $v^E$  которого существенно изменяются с температурой  $T_0$ , в том числе, с переходом через нулевое значение.

#### ***Прибор для косвенного контроля фазового состояния раствора.***

Для контроля фазовых состояний и их взаимосвязи со свойствами теплопереноса была разработана методика автоматического управления функцией

воздействия в рамках метода импульсного нагрева проволочного зонда, который первоначально разрабатывался для исследования явления спонтанного вскипания высокоперегретых жидкостей. Данная методика позволяет выбирать траекторию нагрева с учетом деталей фазовой диаграммы раствора и характерных времен релаксационных процессов, подготавливающих макроскопический фазовый переход.

В данном исследовании импульсный метод целенаправленно адаптирован к задаче дистанционного контроля фазового состояния растворов с ВКТР в технологических процессах, сопровождающихся изменением как температуры в реакторе, так и концентрации реакционно-способного компонента, в данном случае – непредельного углеводорода. Его работа основана на контроле косвенного признака, соотносимого с данными визуального метода и связанного с нарушением гомогенности среды при приближении к линии фазового разделения. В случае ВКТР речь идет о приближении сверху, а параметром опыта служит температура в объеме раствора  $T_0$ . В опыте отслеживается изменение коэффициента теплоотдачи от зонда к веществу при систематическом изменении параметра. Его аналогом, настроенным на автоматизацию контроля, служила продолжительность повторного догрева зонда до характерной температуры опыта  $t_L(T_0)$ . Для повышения чувствительными к малым изменениям свойств раствора в исходном состоянии, значение этой температуры ( $T_L$ ) выбиралось в области его перегретых (относительно температуры равновесия жидкости с паром при заданном давлении) состояний. В серии поисковых опытов было выяснено, что чувствительность методики напрямую зависит от глубины захода в область перегретых состояний. Появление микронеоднородности раствора сопровождалось уменьшением коэффициента теплоотдачи (то есть, уменьшением  $t_L$ ) в режиме тепловой проводимости, задаваемом условиями опыта.

Данная экспресс-методика и программное обеспечение для оценки бинодали жидкость–жидкость были опробованы на бинарных растворах непредельный углеводород – фторуглерод, имеющих практическое значение. Были получены непротиворечивые и повторяемые результаты. В случае растворов гексен-ПФМЦГ и гексен-ПФДМЦГ показана прямая зависимость чувствительности методики от глубины захода в область перегретых состояний. В итоге, разработанный метод может быть адаптирован к задаче дистанционного контроля фазового разделения растворов с ВКТР в технологических процессах, сопровождающимся изменением как температуры в реакторе, так и концентрации реакционно-способного компонента – непредельного углеводорода.

Импульсный метод позволяет заранее почувствовать приближение температуры расслоения жидких фаз от 1 К до 5 К в зависимости от концентрации (Рисунок 13). Эта особенность имеет практическое значение для решения задач дистанционного контроля однородности раствора переменного состава в непрозрачных корпусах химических реакторов.

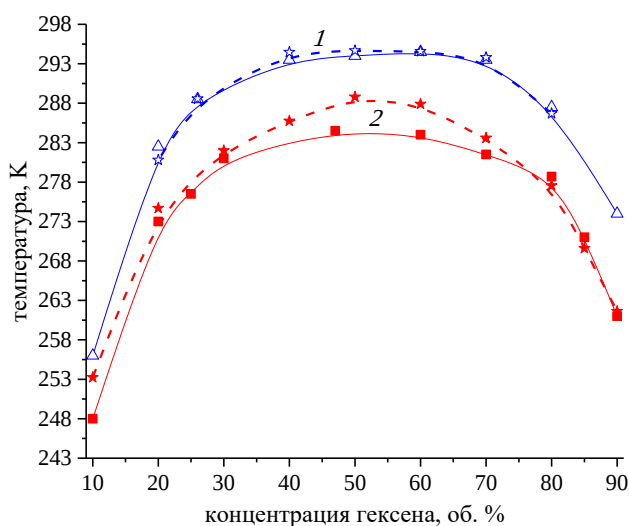


Рисунок 13а – Линии равновесия жидкость-жидкость растворов: 1 – гексен–ПФМЦГ (значения  $T_L=388$  K); 2 – гексен–ПФМЦГ ( $T_L=373$  K), полученные термоимпульсным (штриховые кривые) и визуальным (сплошные кривые) методами.

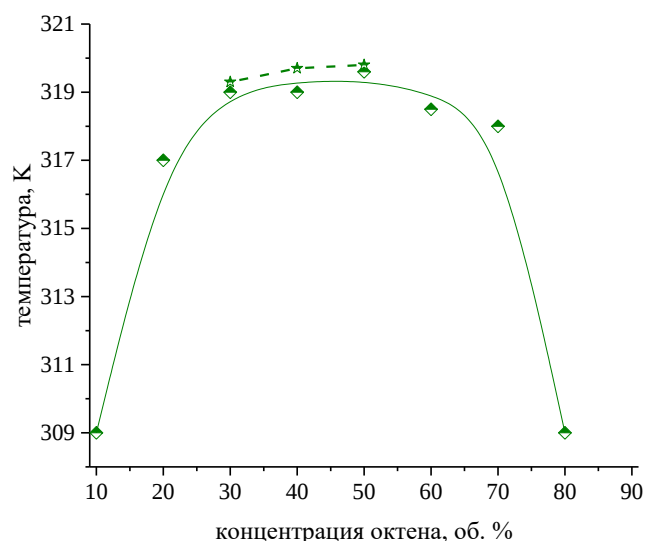


Рисунок 13b – Опытные значения линии равновесия жидкость-жидкость раствора октен–ПФМЦГ ( $T_L=406$  K), полученные термоимпульсным (штриховая кривая) и визуальным (сплошная кривая) методами.

## Основные результаты по теме диссертации

Для всех растворов, во всей области изменения концентрации обнаружено снижение интенсивности переноса теплоты относительно ее аддитивных значений. Количественные значения такого снижения зависят от формы представления концентрации (массовые, объемные или мольные доли) и, очевидно, от характерного размера нагревателя. **Основным итогом исследования** мы считаем подтверждение гипотезы Л.П. Филиппова новым экспериментальным материалом, основанном на существенном расширении области изменения объема смешения и температуры раствора. Дальнейшее выяснение степени общности гипотезы пойдет, видимо, по пути исследования специфических случаев межмолекулярного взаимодействия компонентов, в том числе, для растворов в неустойчивых состояниях.

1. В ходе импульсных опытов показана возможность определения коэффициента теплоотдачи от малоинерционного нагревателя-зонда, погруженного в бинарную жидкость. Опыты проведены в широкой области изменения давления и температуры, включая области не вполне устойчивых и неустойчивых состояний. Выбор тепловой моды, а именно, термостабилизации импульсно нагретого зонда, позволил сопоставить интенсивность переноса теплоты (параметром служило значение концентрации) в режиме преобладающей тепловой проводимости. Момент включения сложного теплообмена выявлялся по характерному возмущению сигнала-отклика.

2. Развита относительно новый вариант метода термостабилизации применительно к сопоставлению коэффициента теплоотдачи (КТО) к растворам. Важная черта метода состоит в осуществлении тонкого изменения температуры зонда. Оно

воспроизводится от опыта к опыту, в том числе, вблизи характерных температурных значений, связанных со вскипанием или спинодальным распадом раствора. Сопоставление КТО выполняется на основе первичных данных опыта и не требует модельных преобразований.

3. Показана перспектива применения растворов, имеющих НКТР, в качестве теплоносителей в технологиях, допускающих мощное локальное тепловыделение. Спинодальный распад инициирует движение жидкости без ее перевода в парообразное состояние. Собственно усиление теплосъема при распаде служит естественным препятствием для существенного повышения температуры стенки, в том числе, до температуры достижимого перегрева легкокипящей фазы.

4. Получено новое знание о появлении дополнительного теплового сопротивления в растворах, основанное на существенном расширении области изменения значений  $v^E$  и  $T$ . Обобщение результатов опытов в координатах  $\Delta\dot{K}_T - v^E$  показало, что для всех исследованных растворов, во всем диапазоне концентраций наблюдается ухудшение тепловой проводимости растворов относительно аддитивных значений.

5. Обнаружено, что с ростом объема смешения (по модулю) наблюдается повышение дополнительного теплового сопротивления в растворах. Оно имеет близкий к линейному характер относительно изменения абсолютного значения объема смешения. В свою очередь, зависимость приведенного коэффициента теплоотдачи от приведенной разности аддитивного и реального значения плотности также имеет линейный характер. Причём прослеживается разбиение на отдельные группы линейных зависимостей, связанных с определенным классом растворов.

6. Результаты опытов косвенно указывают на объем смешения при исходной температуре раствора, то есть,  $v^E(T = T_0)$ , как на ключевой фактор для значения теплоотдачи к импульсно перегретому раствору  $\Delta\dot{K}_T(T_{st})$ . Если это действительно так, то о величине дополнительного теплового сопротивления импульсно перегретого раствора можно предварительно судить по данным для  $v^E(T = T_0)$ .

7. Определены линии фазового разделения по механизму жидкость-жидкость растворов с ВКТР непредельный углеводород – фторуглерод, используемых в качестве сред для синтеза противотурбулентных присадок. Продемонстрирована применимость метода двухимпульсного нагрева зонда для автономного контроля фазового состояния растворов вблизи линии фазового разделения.

8. Сопоставлена тепловая проводимость данных растворов при температурах, существенно превышающих значение ВКТР. На фоне существенного различия в значениях коэффициента теплоотдачи (и теплопроводности) компонентов оценен масштаб изменения теплового сопротивления раствора при изменении содержания непредельного углеводорода, сопровождающем процесс синтеза присадок.

## Перспективы дальнейшей разработки темы

Подводя итог, укажем два основных направления развития исследования. Первое связано с дальнейшим выяснением степени общности гипотезы Л.П. Филиппова. Оно пойдет по пути изучения специфических случаев межмолекулярного взаимодействия компонентов, в том числе, для растворов в неустойчивых состояниях, перегретых относительно диффузионной спинодали. Второе направление связано с разработкой автономного устройства, осуществляющего предложенный способ мониторинга расслаивающихся растворов в непрозрачных сосудах, применительно к запросам синтеза противотурбулентных присадок.

## Основное содержание диссертации изложено в работах:

*Статьи в рецензируемых научных изданиях, определённых ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:*

1. Volosnikov D.V. Short-term thermal stability of transformer and motor oils at wide range of moisture contents / D.V. Volosnikov, **I.I. Povolotskiy**, P.V. Skripov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Т. 946. – С. 012108. 0,438 п.л. / 0,146 п.л. (Scopus)
2. Volosnikov D.V. Correlation of thermal resistance and excess volume for superheated aqueous solutions of glycols / D.V. Volosnikov, **I.I. Povolotskiy**, A.A. Igolnikov, D.A. Galkin // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Т. 1105. – С. 012153. 0,438 п.л. / 0,11 п.л. (Scopus)
3. Volosnikov D.V. Possibilities of heat pulse probing method for determining the phase diagram of partially-miscible liquid mixtures / D.V. Volosnikov, **I.I. Povolotskiy** // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Т. 1677. – № 1. – С. 012100. 0,375 п.л. / 0,188 п.л. (Scopus)
4. Волосников Д.В. Взаимосвязь тепловой проводимости импульсно нагретого раствора с его объемом смешения / Д.В. Волосников, **И.И. Поволоцкий**, П.В. Скрипов // Письма в журнал технической физики. – 2021. – Т. 47. – № 22. – С. 21-23. 0,187 п.л. / 0,0625 п.л.
5. Волосников Д.В. Теплоотдача к водным растворам гликолей в импульсно перегретых состояниях / Д.В. Волосников, **И.И. Поволоцкий**, А.А. Старостин, П.В. Скрипов // Теплофизика высоких температур. – 2021. – Т. 59. – № 3. – С. 384-393. 0,563 п.л. / 0,141 п.л.
6. Volosnikov D.V. Intensification of heat transfer during spinodal decomposition of a superheated aqueous oligomer solution / D.V. Volosnikov, **I.I. Povolotskiy**, A.A. Igolnikov, M.G. Vasin, L.D. Son, P.V. Skripov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Т. 1787. – № 1. – С. 012032. 0,563 п.л. / 0,094 п.л. (Scopus)
7. Povolotskiy I.I. Heat Conduction of Superheated Mixtures: Relationship with Excess Volume / **I.I. Povolotskiy**, D.V. Volosnikov, P.V. Skripov // Journal of Engineering Thermophysics. – 2022. – Vol. 31. – Heat Conduction of Superheated Mixtures. – № 1. – P. 19-31. 0,813 п.л. / 0,271 п.л. (Scopus)

*Публикации в других научных изданиях:*

8. Поволоцкий И.И. Методические особенности экспериментального исследования теплопереноса в сверхкритическом изопропанол в условиях мощного импульсного тепловыделения / **И.И. Поволоцкий**, Д.В. Волосников, С.Б. Рютин, П.В. Скрипов // Сборник тезисов XVI Всероссийской школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-16) 12-19 ноября 2015 г. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2015. С. 141. 0,0625 п.л. / 0,0156 п.л.

9. Поволоцкий И.И. Способ быстрого обнаружения влаги в маслах / **И.И. Поволоцкий**, Д.В. Волосников, К.В. Лукьянов, П.В. Скрипов // Сборник тезисов Третьей Международной молодежной научной конференции Физика. Технологии. Инновации. 16 - 20 мая 2016 г. Екатеринбург, ФТИ, 2016. С. 64-65. 0,125 п.л. / 0,031 п.л.

10. Поволоцкий И.И. Методические особенности двухимпульсного теплового тестирования нагреваемого масла / **И.И. Поволоцкий**, Д.В. Волосников, П.В. Скрипов // Сборник тезисов XVII Всероссийской школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-17) 15-22 ноября 2016 г. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2016. С. 164. 0,0625 п.л. / 0,0208 п.л.

11. Поволоцкий И.И. Исследование кондуктивного переноса тепла и характерных времен начала конвекции в сверхкритическом изопропанол при импульсном изобарном нагреве / **И.И. Поволоцкий**, Д.В. Волосников, С.Б. Рютин // Сборник тезисов Третьей Международной молодежной научной конференции Физика. Технологии. Инновации. 16 - 20 мая 2016 г. Екатеринбург, ФТИ, 2016. С. 62-63. 0,125 п.л. / 0,0417 п.л.

12. Поволоцкий И.И. Сопоставление теплового сопротивления растворов с отрицательными объемами смешения / **И.И. Поволоцкий**, Д.В. Волосников, Д.А. Галкин, П.В. Скрипов // Сборник тезисов XVII Всероссийской школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-17). – 15-22 ноября 2016 г., Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2016 С. 165. 0,0625 п.л. / 0,016 п.л.

13. Поволоцкий И.И. Тепловое сопротивление растворов с отрицательным объемом смешения: изопропанол-этиленгликоль, изопропанол-триэтиленгликоль / **И.И. Поволоцкий**, Д.В. Волосников, П.В. Скрипов // Сборник тезисов XXIII Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-23). 1 - 8 апреля 2017 г. Екатеринбург – Ростов-на-Дону: АСФ России, 2017 С. 479-480. 0,0625 п.л. / 0,031 п.л.

14. Поволоцкий И.И. Импульсный термоконтроль технологических жидкостей / **И.И. Поволоцкий**, Д.В. Волосников, П.В. Скрипов // Сборник тезисов XVIII Всероссийской школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-18). 16 – 23 ноября 2017 г. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2017. С. 160. 0,0625 п.л. / 0,0208 п.л.

15. Поволоцкий И.И. Тепловое сопротивление перегретых водных растворов / **И.И. Поволоцкий**, Д.В. Волосников, П.В. Скрипов // Сборник

тезисов XV Российской конференции (с международным участием) по теплофизическим свойствам веществ (РКТС-15) 15-17 октября 2018г. Москва: НИТУ «МИСиС». С. 49. 0,0625 п.л. / 0,0208 п.л.

16. Поволоцкий И.И. Теплофизический контроль влаги в гидравлических жидкостях / **И.И. Поволоцкий**, Д.В. Волосников, П.В. Скрипов // Сборник тезисов V Международной молодежной научной конференции, посвященной памяти Почетного профессора УрФУ В.С. Кортова, Физика. Технологии. Инновации. (ФТИ-2018), 14–18 мая 2018 г. Екатеринбург: УрФУ. С. 24-25. 0,125 п.л. / 0,0417 п.л.

17. Поволоцкий И.И. Диагностика ресурса моторного масла / **И.И. Поволоцкий**, Д.В. Волосников, П.В. Скрипов // Сборник тезисов XIX Всероссийской школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-19). 15-22 ноября 2018 г. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН. С. 161. 0,125 п.л. / 0,0417 п.л.

18. Поволоцкий И.И. Фазовая диаграмма и тепловая проводимость расслаивающихся растворов / **И.И. Поволоцкий**, Д.В. Волосников, П.В. Скрипов // Сборник тезисов XX Юбилейной Всероссийской школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-20). 21-28 ноября 2019 г. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН. С. 183. 0,125 п.л. / 0,0417 п.л.

19. Поволоцкий И.И. Исследование фазовой диаграммы и оценка тепловой проводимости расслаивающихся растворов / **И.И. Поволоцкий**, Д.В. Волосников, П.В. Скрипов // Сборник научных трудов VII Информационной школы молодого ученого. 23-27 сентября 2019 г. Екатеринбург: ЦНБ УрО РАН. С. 78-86. 0,563 п.л. / 0,188 п.л.

20. Поволоцкий И.И. Фазовая диаграмма и тепловая проводимость расслаивающихся растворов / **И.И. Поволоцкий**, Д.В. Волосников, П.В. Скрипов // В сборнике тезисов XXXVI Сибирский теплофизический семинар, 5–7 октября 2020 г. Новосибирск: ИТ СО РАН. С. 146. 0,0625 п.л. / 0,0208 п.л.

21. Поволоцкий И.И. Тепловая проводимость фторированных растворов непредельных углеводородов с положительным объемом смешения / **И.И. Поволоцкий**, Д.В. Волосников, П.В. Скрипов, А.А. Марчукова, Н.А. Распутин // Сборник тезисов VIII Международной молодежной научной конференции Физика. Технологии. Инновации. (ФТИ-2021). 17-21 мая 2021 г. Екатеринбург: УрФУ. С.655-656. 0,125 п.л. / 0,025 п.л.

22. Поволоцкий И.И. Исследование фазовой диаграммы расслаивающихся растворов октен – фторированный углерод / Д.В. Волосников, **И.И. Поволоцкий**, П.В. Скрипов // Сборник тезисов XXI Всероссийской школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-21). 18-25 марта 2021 г. Екатеринбург, ИФМ УрО РАН. 2021. С. 231. 0,125 п.л. / 0,0417 п.л.

23. Поволоцкий И.И. Теплоотдача к водным растворам с широкой областью несовместимости компонентов / **И.И. Поволоцкий**, Д.В. Волосников,

П.В. Скрипов // Сборник тезисов XXIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках», 24-28 мая 2021 г. Екатеринбург – Москва: МЭИ. С. 102-103. 0,125 п.л. / 0,0417 п.л.

24. Поволоцкий И.И. К гипотезе Л.П. Филиппова о дополнительном тепловом сопротивлении в растворах / **И.И. Поволоцкий**, Д.В. Волосников, П.В. Скрипов // Сборник тезисов XXXVII Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых ученых Сибирский теплофизический семинар (СТС-37). 14 - 16 сентября 2021 г. Новосибирск: ИТ СО РАН. С.224. 0,0625 п.л. / 0,0208 п.л.

25. Povolotskiy I.I. Control of water traces in jet fuel by heat-pulse technique / D.V. Volosnikov, **I.I. Povolotskiy**, A.A. Starostin, P.V. Skripov // Nonequilibrium natural and technological processes. Moscow: TORUS PRESS, 2021. p. 262-266. 0,25 п.л. / 0,0625 п.л.