

УДК 536.24

ТЕПЛООТДАЧА К ВОДНЫМ РАСТВОРАМ ГЛИКОЛЕЙ В ИМПУЛЬСНО ПЕРЕГРЕТЫХ СОСТОЯНИЯХ

© 2021 г. Д. В. Волосников¹, *, И. И. Поволоцкий¹, А. А. Старостин¹, П. В. Скрипов¹

¹ФГБУН Институт теплофизики Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Россия

*E-mail: dima_volosnikov@mail.ru

Поступила в редакцию 19.05.2020 г.

После доработки 15.07.2020 г.

Принята к публикации 14.10.2020 г.

В экспериментах по управляемому импульсному нагреву вещества сопоставлена теплоотдача к водным растворам гликолей и пропиленгликолей в полном диапазоне составов. Исследование проведено в области устойчивых и перегретых состояний. Применен режим термостабилизации нагревателя-зонда при достижении заданной температуры. Характерная продолжительность нагрева составляла 10 мс. Показана принципиальная осуществимость измерений первичных величин в водных растворах, перегретых относительно температуры равновесия жидкость–пар. В пробных экспериментах с раствором полипропиленгликоля ППГ-425 в воде измерения проведены при кратковременном перегреве относительно температуры равновесия жидкость–жидкость, а также в некоторой области составов относительно температуры диффузионной спинодали раствора.

DOI: 10.31857/S0040364421020150

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные исследования переноса тепла с поверхности нагревателей (в пренебрежении вкладом конвективного теплообмена и излучения) обычно проводятся в области устойчивых состояний жидкостей [1–3]. Исследования переноса тепла в жидкостях, перегретых относительно температуры равновесия жидкость–пар, в виду очевидных экспериментальных трудностей [4] носят отрывочный характер [5–8]. В то же время явление перегрева сопровождается, как правило, процессы мощного тепловыделения, быстрого сброса давления и растяжения жидкостей (см. работы [9–13] и библиографию в них). Формальная экстраполяция значений тепловых свойств жидкостей за линию равновесия жидкость–пар недостаточно надежна. Действительно, за редкими исключениями температурная зависимость теплопроводности и изобарной теплоемкости имеет противоположные знаки в широкой области изменения температуры [14]. В первую очередь ненадежность экстраполяции относится к двух- (и более) компонентным системам [4]. Область двухфазных равновесий при переходе к раствору расширяется, релаксация может идти по нескольким признакам, а избыточные функции — изменять знак с температурой. В таких условиях на первый план выходит эксперимент. Основные методологические требования заключаются в минимизации произведения измерительного объема на продолжительность наблюдения пере-

гретого состояния и автоматизации измерений первичных данных, по которым осуществляется последующий расчет тепловых свойств, с микро-секундным разрешением по времени.

Цель настоящей работы состояла в изучении характерных черт теплоотдачи к импульсно перегретым растворам в сравнении с теплоотдачей, наблюдаемой в области устойчивых состояний раствора и в чистых компонентах при сопоставимых условиях опыта. Для ее достижения был применен метод управляемого импульсного нагрева проволочного зонда [15], а именно, режим термостабилизации при достижении температурой зонда заданного значения [16, 17]. Суть этой методики и ее аппаратное оформление соответствуют методическим требованиям, упомянутым выше. Объектами изучения служили водные растворы низкомолекулярных гомологов этиленгликоля и пропиленгликоля. Выбор объектов обусловлен важностью развития теплофизических моделей систем с большими отклонениями от идеального поведения и широким спектром их применения в теплотехнике, фармацевтической, химической и пищевой промышленности. В частности, низкая токсичность и высокая растворимость гликолей в воде позволяют использовать их для очистки биологических материалов и в качестве добавки в производстве пищевых пленок и покрытий [18]. Главная мотивация данного исследования — формирование экспериментальной основы перехода к изучению более сложных си-

стем, а именно, водных растворов полиэтиленгликоля и полипропиленгликоля. В отличие от низкомолекулярных растворов им свойственна ограниченная смешиваемость, характеризуемая нижней критической температурой растворения (НКТР). Привлекательность данных растворов для исследователя состоит в том, что их нагрев из устойчивого состояния может сопровождаться кратковременным перегревом не только относительно температуры равновесия жидкость—пар, но и температуры равновесия жидкость—жидкость (бинодали расслаивающегося раствора [19]), а также в некоторой области составов температуры диффузионной спинодали раствора. Исследование характерного времени жизни растворов и особенностей переноса тепла в метастабильных (не вполне устойчивых) и термодинамически неустойчивых состояниях, в том числе на фоне фазовых переходов и спинодального распада [20], является основной целью данного исследования.

ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООБМЕНА ИМПУЛЬСНО ПЕРЕГРЕТЫХ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ГЛИКОЛЕЙ

Управляемый импульсный нагрев в режиме термостабилизации проволоочного зонда. Суть данного режима состоит в создании кратковременных

квазиизотермических условий для импульсно нагреваемого зонда в веществе при соответствующем регулировании мощности его нагрева. При нагреве температура зонда увеличивается от начального значения T_0 до выбранного значения $T_{st}(t_2 > t_1) \approx \text{const}$ за время порядка $t_1 \sim 10^{-4}$ с и в дальнейшем поддерживается постоянной на заданном интервале времени $t_2 \sim 10^{-2}$ с. В опыте измеряются значения падения напряжения на зонде и образцовом (“токовом”) резисторе, включенном последовательно зонду. По первичным данным с привлечением данных стандартной градуировки платиновых термометров рассчитываются значения температуры зонда $T_{st}(t)$ и электрической мощности $P(t; T_{st})$, необходимой для ее поддержания (рис. 1). Далее определяются средняя (по поверхности зонда) плотность теплового потока через поверхность зонда и мгновенный коэффициент теплоотдачи $K_T(t)$ как основная переменная в опытах с мощным тепловыделением при заданном температурном напоре $\Delta T = T_{st} - T_0$:

$$K_T(t) = P(t)/(\Delta T S_w), \quad (1)$$

где S_w — площадь поверхности зонда. При заданном значении ΔT значения мощности $P(t)$ чувствительны к изменению интенсивности переноса тепла в серии опытов: чем выше значение $P(t)$, тем выше $K_T(t)$.

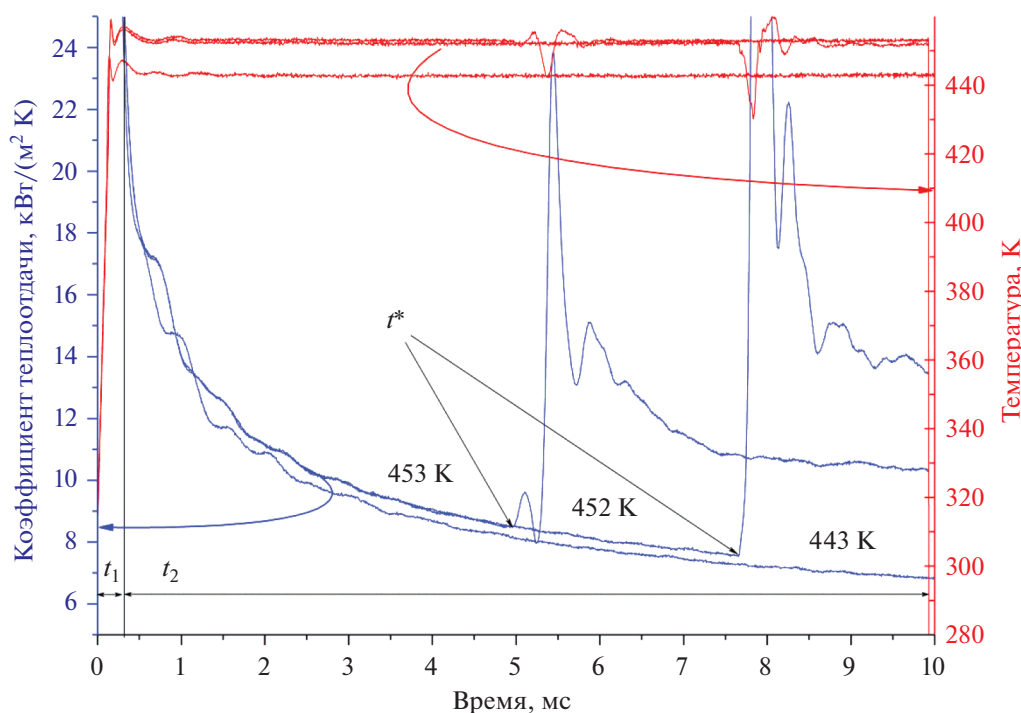


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи к изопропанолу, рассчитанного по измеренным значениям мощности $P(t)$ для трех значений T_{st} : давление — атмосферное; монотонный ход кривых возмущен процессом спонтанного вскипания жидкости.

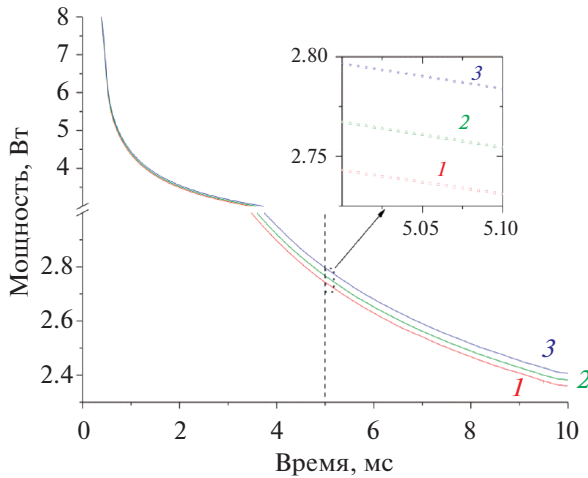


Рис. 2. Изменение мощности нагрева зонда в воде при значениях термостабилизации $T_{st}(t) = 423$ К и различных давлениях: 1 – 0.1 МПа, 2 – 20, 3 – 40.

Измерение мгновенного коэффициента теплоотдачи (1) возможно не только в области устойчивых состояний вещества, где время жизни системы ничем не ограничено, но и в области перегретых (короткоживущих) состояний при $T_{st}(t < t^*) > T_s$, где T_s – температура равновесия жидкость–пар вещества при заданном давлении p ; t^* – время жизни вещества при заданной тепловой моде до его спонтанного вскипания [21]. В качестве примера на рис. 1 моменты вскипания t^* для трех значений перегрева изопропанола ($T_s = 356$ К) показаны стрелочками. При повышении степени перегрева растет чувствительность

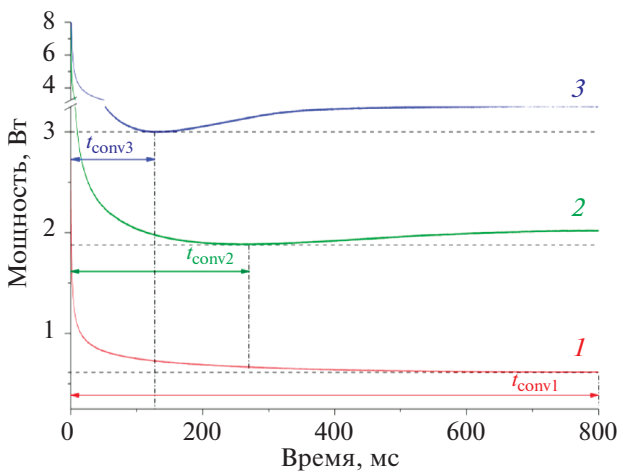


Рис. 3. Мощность нагрева зонда, необходимая для его термостабилизации в воде, при трех значениях $T_{st}(t)$: 1 – 373 К, 2 – 473, 3 – 548; момент проявления признаков конвекции, мс: $t_{conv1} = 800$, $t_{conv2} = 264$, $t_{conv3} = 125$; давление – 30 МПа.

методики к изменениям параметров опыта, в частности к изменениям давления, сопровождающимся малым изменением теплофизических свойств жидкости (рис. 2). Одновременно сокращается характерное время “включения” конвективного режима теплообмена (рис. 3). Признаком конвекции, как и ранее [22, 23], служило изменение знака производной от функции $P_i(t)$. С учетом полученного результата характерная продолжительность нагрева была выбрана равной 10 мс.

Достаточная повторяемость данных опыта в серии измерений и их чувствительность к малым изменениям свойств жидкости, наряду с постоянством свойств зонда в продолжительных сериях измерений, делают обоснованным переход к относительному варианту измерений. Такой переход удобен в связи с существенной компенсацией ряда поправок, присущих зондовым методам, в частности вклада эффектов переноса тепла в спай и движения зонда (ввиду его термического расширения) на начальной стадии нагрева, $t < t_2$ на рис. 1.

В настоящей работе осуществлено сопоставление коэффициентов теплоотдачи к растворам, когда параметром служит концентрация при заданных значениях p и T_{st} . Характерный результат для одного из растворов представлен на рис. 4. Обнаружено, что экспериментальные кривые $P_3(t)$, $P_5(t)$ и $P_7(t)$ раствора лежат ниже их аддитивных значений $P_2(t)$, $P_4(t)$ и $P_6(t)$, рассчитанных для соответствующих концентраций на основе данных для чистых компонентов (индексы 1 и 8): $P_{add}(t) = P_8(t) + C(P_1(t) - P_8(t))/100$, где C – концентрация воды в мас. %. Данный эффект для

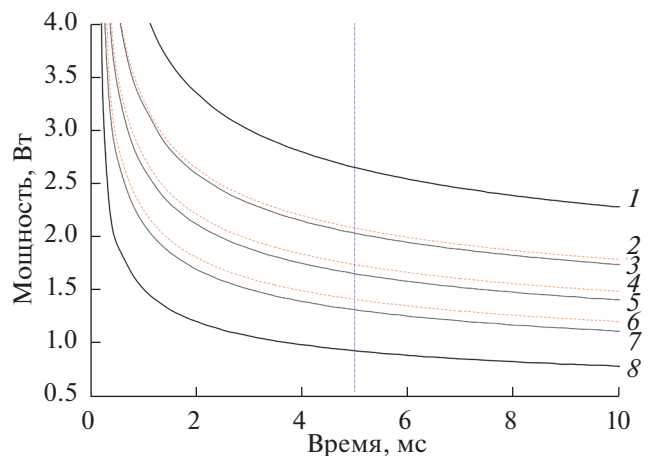


Рис. 4. Сопоставление экспериментальных ($P_3(t)$, $P_5(t)$ и $P_7(t)$ – сплошные линии) и аддитивных ($P_2(t)$, $P_4(t)$ и $P_6(t)$ – пунктир) значений мощности нагрева зонда при $T_{st}(t) = 423$ К в водном растворе триэтиленгликоля: 1 – вода $P_1(t)$; 2, 3 – 28 мас. %; 4, 5 – 48; 6, 7 – 67; 8 – триэтиленгликоль $P_8(t)$; вертикальная линия – произвольно выбранный момент времени $t = 5$ мс в относительном варианте измерений.

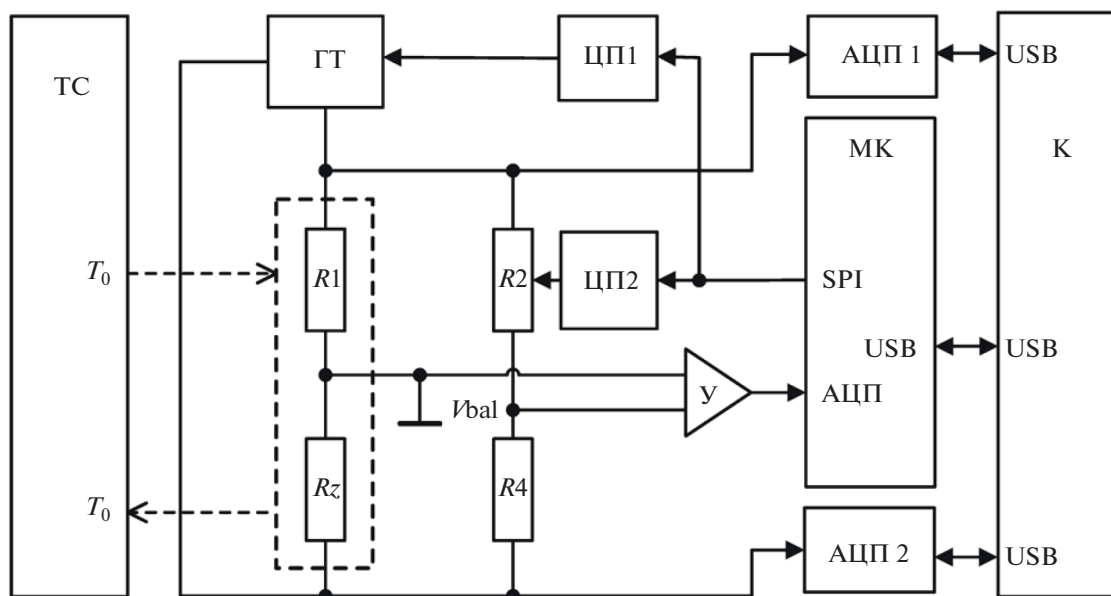


Рис. 5. Функциональная схема установки с цифровым управлением импульсного нагрева проволочного зонда: ТС – жидкостный термостат начальной температуры T_0 образца; К – компьютер; МК – микроконтроллер; У – усилитель напряжения V_{bal} разбаланса моста; ЦП1, ЦП2 – цифровые потенциометры; ГТ – генератор тока; R_1 , R_4 – постоянные сопротивления моста; R_2 – настраиваемое сопротивление в составе ЦП2; R_z – термосопротивление проволочного зонда; АЦП1, АЦП2 – преобразователи напряжений на сопротивлениях R_1 и R_z .

растворов с отрицательным объемом смешения обсуждается ниже.

Автоматизированная установка и устройство управляемого импульсного нагрева зонда. Для решения поставленной задачи применена автоматизированная установка, осуществляющая метод управления мощностью тепловыделения в проволочном зонде – термометре сопротивления, непосредственно в ходе его нагрева (рис. 5). В состав установки входит циркуляционный жидкостный термостат ТС, измерительная камера [24] (не показана на рисунке), компьютер К и схема управления током нагрева с микроконтроллером МК. Начальные установки МК передаются от управляющей программы компьютера. Импульсный нагрев производится под управлением МК и включает в себя быстрый нагрев зонда и последующее поддержание заданного среднего значения его температуры T_{st} , в том числе на фоне сосредоточенных во времени фазовых переходов [10, 25, 26]. Для стабилизации средней температуры зонда по значению его термосопротивления R_z используется принцип “автобаланса моста”. Мост составлен из постоянных (R_1 , R_4) и переменных (R_2 , R_z) сопротивлений. Генератор тока ГТ может изменять значение тока нагрева, протекающего через R_z , по сигналу напряжения управления от цифрового потенциометра ЦП1. Программа управления микроконтроллера МК формирует сигнал отрицательной обратной связи

через ЦП1 по усиленному сигналу напряжения разбаланса моста V_{bal} , поступающему на вход АЦП МК. В результате схема стремится обеспечить равновесие моста и, как следствие, постоянство значения R_z и средней температуры нагрева проволочного зонда. Величина удерживаемого значения R_z в уравновешенном мосте зависит от величины сопротивления R_2 в составе цифрового потенциометра ЦП2: $R_z = R_1 R_4 / R_2$. Таким образом, можно настраивать мост с помощью ЦП2 на определенное значение средней температуры нагрева зонда по его термосопротивлению R_z и поддерживать это значение в ходе импульсного опыта. Время установления заданного значения R_z составляет десятки микросекунд и зависит от свойств образца и масштаба дрейфа значения T_{st} на участке t_2 (см. рис. 1). В настоящих опытах величина дрейфа составляла около 1% от заданного температурного напора.

Преимущество цифровой схемы управления позволяет обеспечить повторяемость кривой нагрева лучше 0.1% в серии опытов из десятков импульсов. Для измерения напряжений на сопротивлениях R_1 и R_z используются быстродействующие 14-разрядные преобразователи Е14-440 (АЦП1 и АЦП2 на рис. 5), что обуславливает общую нелинейность измерений в 0.05% и дифференциальную ошибку в 0.02%. Погрешность определения сопротивления образцового резистора $\delta R_1 \approx 0.1\%$. Погрешность измерения термо-

сопротивления $\delta R_z(t) \approx 0.9\%$ (см. подробнее [16]). Таким образом, погрешность измерения мощности $\delta P(t)$ равна 1.0%. Погрешности определения радиуса зонда r и его длины l составляют $\delta r \approx 2.5\%$ и $\delta l \approx 1\%$ соответственно. Погрешность определения теплового потока от зонда в вещество оценивается величиной $\delta q(t) \approx (3-4)\%$. В случае относительных измерений на одном зонде погрешность определения изменений теплового потока исключает погрешности определения площади поверхности зонда. В опытах используется тонкая платиновая проволока диаметром 0.02 мм и длиной около 10 мм. Соотношение боковой и торцевой поверхностей проволоки составляет около 1000. Оценка теплотерь в токоподводы в опытах на разной длине проволоки с экстраполяцией на нулевое значение дает менее 1% от подводимой мощности [27]. Сравнение интенсивности теплоотдачи к растворам с различной концентрацией компонентов производится при одном фиксированном значении температуры T_{st} , что позволяет пренебречь изменениями теплотерь в токоподводе с изменением температуры зонда. Общая погрешность определения относительно коэффициента теплоотдачи в данном случае оценена на уровне $\delta \Delta K_T / \overline{K_T} \sim (1.5-2)\%$.

Образцы и их подготовка. Водные растворы изготавливались при смешении дистиллированной воды и соответствующих гликолей. Использовались вещества отечественных производителей и поставщиков (компания “Sigma-Aldrich Rus”): этиленгликоль марки “ч.д.а.”, ГОСТ 10164-75; диэтиленгликоль марки “ч.”, СТП ТУ КОМП 2-315-11; триэтиленгликоль марки “для синтеза” (CAS No.: 112-27-6); пропиленгликоль (Propylene glycol, CAS No.: 57-55-6); дипропиленгликоль (Dipropylene glycol, CAS No.: 25265-71-8); трипропиленгликоль (Tripropylene glycol, CAS No.: 24800-44-0).

Всего подготовлено и исследовано 44 образца водных растворов, из них 21 образец гликолей и 23 – пропиленгликолей. Массовая концентрация веществ гликолевого ряда в водном растворе (мас. %): этиленгликоля (19, 23, 37, 47, 58, 73, 78); диэтиленгликоля (13, 28, 38, 48, 60, 67, 84) и триэтиленгликоля (13, 28, 37, 47, 57, 67, 83). Объем каждого образца получился порядка 20 мл. Погрешность определения концентрации составляла ± 0.5 мас. %.

Навеска образцов проводилась с использованием лабораторных электронных весов специального класса точности Sartogосm br 221s (цена деления – 0.0001 г). Смешивание компонентов осуществлялось в ультразвуковом диспергаторе Quick 218 Ultrasonic Cleaner.

Во всей области изменения состава выбранным образцам свойственны отрицательные значения объема смешения v^E [18, 28]. Увеличение длины молекулярной цепи сопровождалось по-

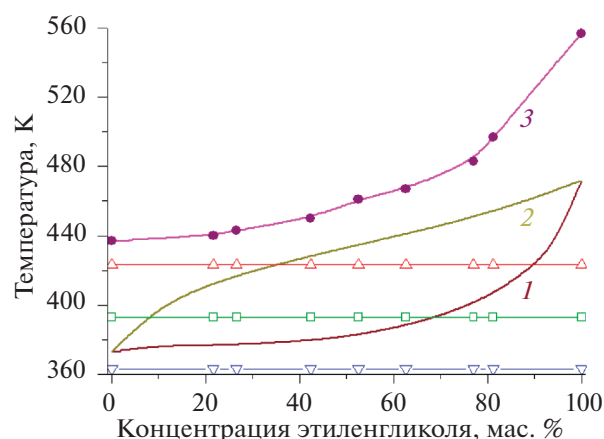


Рис. 6. Фазовая диаграмма раствора вода–этиленгликоль: линии равновесия жидкость–пар (1) и пар–жидкость (2) по данным [28]; 3 – линия достижимого перегрева при импульсном нагреве в режиме термостабилизации; характерная продолжительность термостабилизации составляла единицы миллисекунд; точки на изотермах – исследованные концентрации раствора при атмосферном давлении.

вышением $|v^E|$ как характерного признака неидеальности раствора. Линии насыщения, область изменения значения T_{st} и исследованные концентрации на примере водного раствора этиленгликоля представлены на рис. 6. При зондовых измерениях оценивается масштаб разности температуры центрального участка зонда и рассчитываемого из первичных данных среднего значения T_{st} . При выбранных значениях температуры T_{st} (363–423 К), длины зонда (1 см) и продолжительности нагрева (1–10 мс) данная величина, по оценкам [15], составляет 3–5 К.

Проведение измерений. Образцы растворов исследовались при трех значениях температур термостабилизации зонда T_{st} : 363, 393 и 423 К. Основной массив экспериментальных данных получен при атмосферном давлении и температурах T_{st} , отвечающих как области устойчивых состояний, так и области перегретых состояний (см. рис. 6).

Измерения проводились на платиновом зонде диаметром 20 мкм с начальным сопротивлением $R_0 = 2.84$ Ом при $T_0 = 298$ К. Для каждой “точки” сделано 3–5 измерений. Первичные данные усреднялись и сглаживались. По ним рассчитывались значения мощности. Далее находились аддитивные значения для выбранных концентраций растворов (см. рис. 3 и 7). Результаты опытов для трех растворов сопоставлены в относительном варианте методики. Для выбранного момента времени (в данной работе для $t = 5$ мс) вычислялась приведенная к полусумме коэффициентов

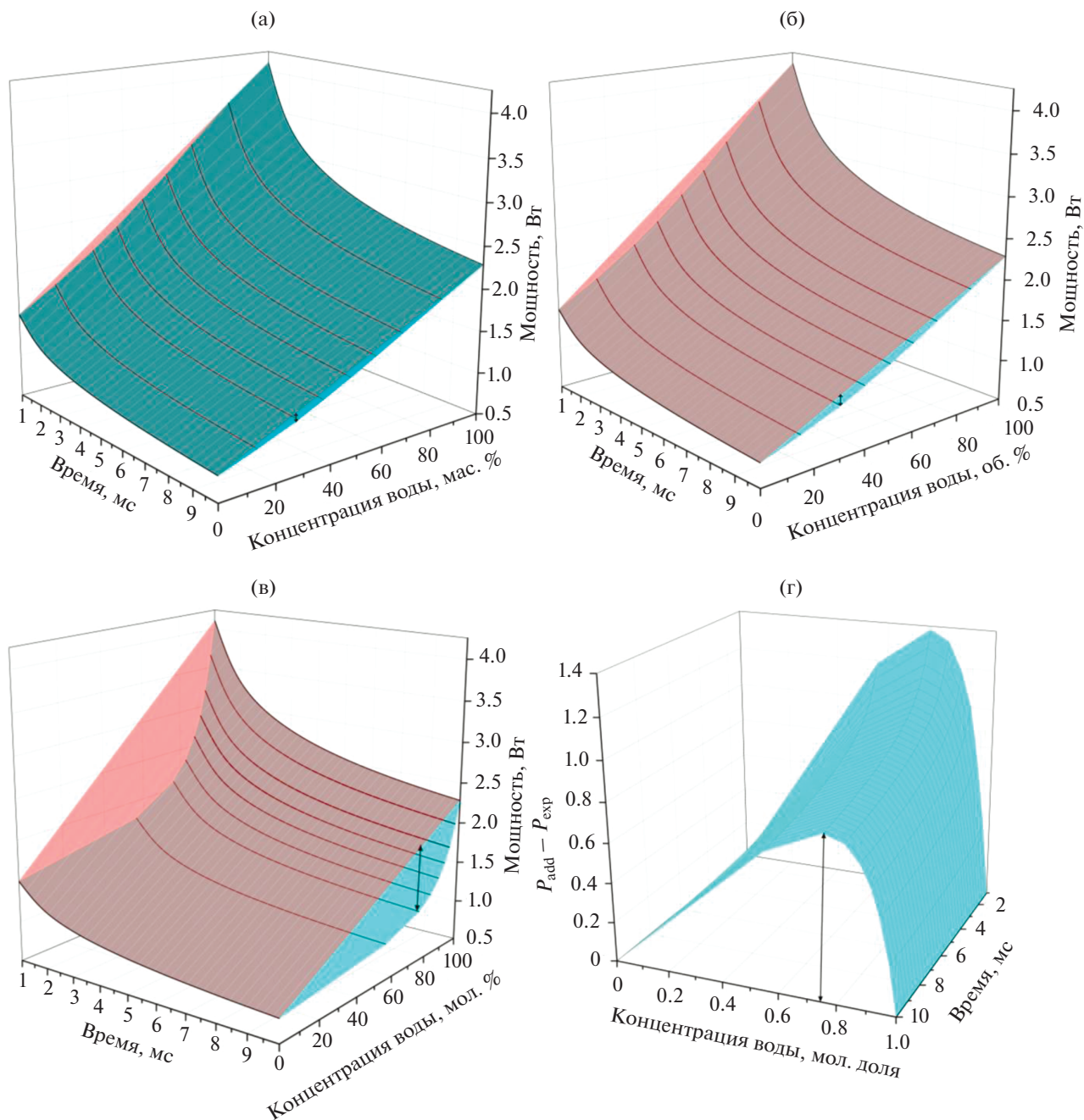


Рис. 7. Массив экспериментальных значений $P_{\text{exp}}(t)$ (поверхность снизу) и аддитивных значений $P_{\text{add}}(t)$ (сверху) при $T_{\text{st}}(t) = 423 \text{ K}$ в водном растворе триэтиленгликоля: (а) – массовые %; (б) – объемные; (в) – мольные; (г) – разность аддитивных и экспериментальных значений мощности $P_{\text{add}}(t) - P_{\text{exp}}(t)$ в зависимости от концентрации, мол. доли; двойная стрелка – концентрация с максимальным отклонением от аддитивных значений.

теплоотдачи чистых компонентов K_0 и K_{100} разность между аддитивными K_{add} и экспериментальными K_{exp} значениями коэффициентов (рис. 8а):

$$\Delta K_T / \bar{K}_T = (K_{\text{add}} - K_{\text{exp}}) / ((K_0 + K_{100}) / 2).$$

Видно, что минимальное отклонение от аддитивного закона имеют данные для этиленгликоля, максимальное отклонение – для триэтиленгликоля.

Результаты и обсуждение. Полученные результаты свидетельствуют об осуществимости измерений коэффициента теплоотдачи к растворам в

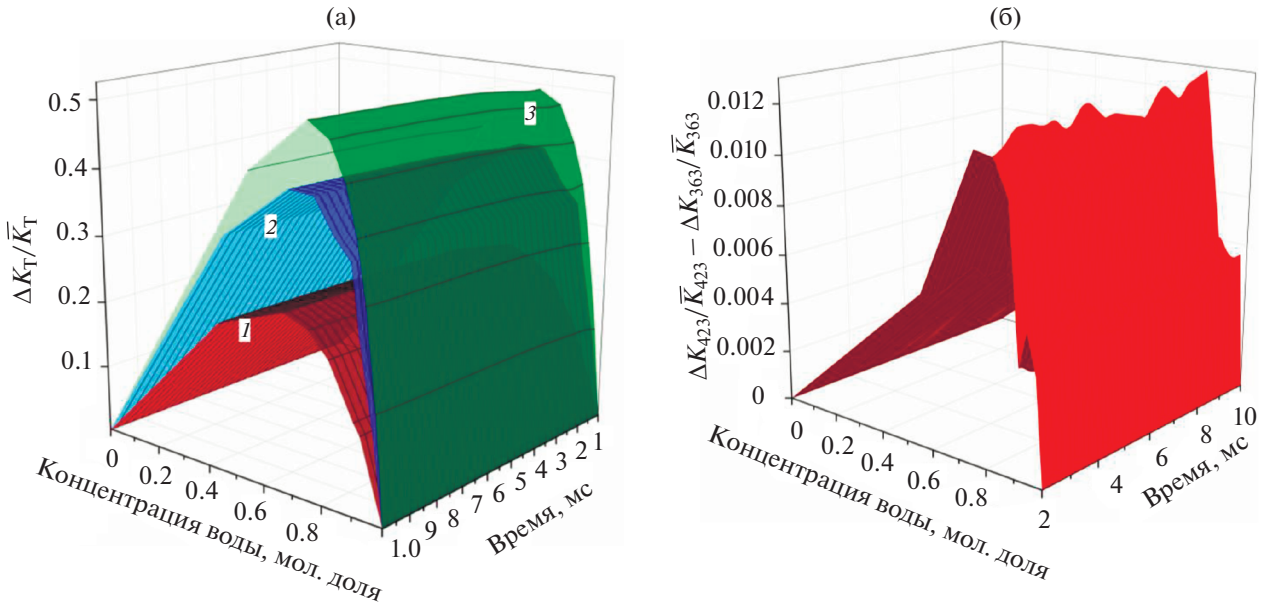


Рис. 8. Временные и концентрационные зависимости $\Delta K_T / \bar{K}_T$ при $T_{st}(t) = 423$ К в водных растворах гликолей (а): 1 – этиленгликоль, 2 – диэтиленгликоль, 3 – триэтиленгликоль; (б) – разность приведенных значений мгновенного коэффициента теплоотдачи водного раствора триэтиленгликоля при 363 и 423 К.

области перегретых состояний. В изученном масштабе характерных времен и степеней перегрева первичные данные, регистрируемые в опыте, имеют вид, подобный виду зависимостей $U_i(t)$ для устойчивых состояний. Здесь U_1 , U_2 – падения напряжения на зонде и на стандартном резисторе соответственно. При заданных в опыте условиях момент пересечения бинаодали жидкость–пар не проявляется на кривых нагрева и не сопровождается возмущениями, свойственными для распада перегретого состояния [17, 29, 30] (см. рис. 1).

В практике теплофизических измерений с помощью проволочного зонда существует проблема отклонения результатов от идеальной модели, основанной на приближениях неподвижности проволоки и однородности распределения температуры по ее объему. В действительности существуют трудно учитываемые потери тепла в токоподводы и при возможном движении проволоки. Дополнительную погрешность за счет неидеальности условий проведенного опыта можно оценить, сравнивая экспериментальные и теоретические зависимости мощности нагрева от времени. В рамках подхода [17] для стадии регулярного режима теплопроводности установлен линейный характер зависимости безразмерного теплового потока от безразмерного времени в виде

$$qr / \lambda \Delta T = A + B Fo^{-1/2}, \quad (2)$$

где $q(t)$ – плотность теплового потока через поверхность термостабилизированного зонда, ΔT – температурный напор, r – радиус зонда, λ – теп-

лопроводность жидкости, Fo – число Фурье, A и B – константы установки. Представление результатов наших опытов в виде зависимости приведенной мощности нагрева от обратного корня из времени действительно хорошо описывалось прямыми линиями. В качестве примера на рис. 9 представлены результаты расчета для воды, как

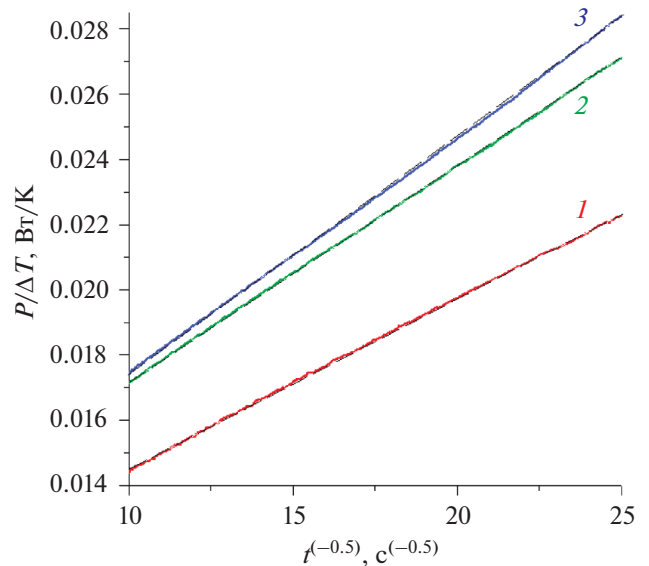


Рис. 9. Приведенные к соответствующему температурному напору кривые мощности нагрева зонда в воде $\Delta T = T_{st}(t) - T_0$ в зависимости от продолжительности нагрева в степени $(-1/2)$: 1 – 75 К, 2 – 175, 3 – 250; штриховые линии – инейная зависимость (2).

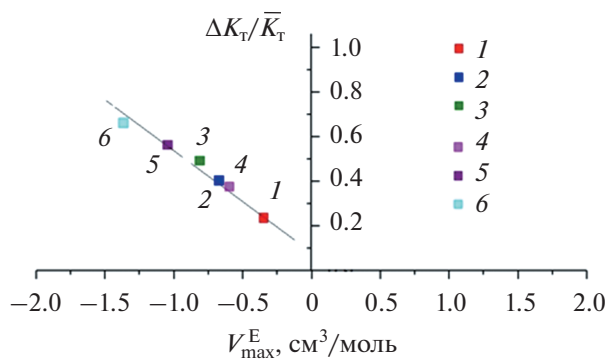


Рис. 10. Значения приведенного коэффициента теплоотдачи водных растворов гликолей и пропиленгликолей при температуре $T_{st}(t) = 423$ К и объема смешения данных растворов при концентрациях, соответствующих максимумам V^E при $T_0 = 303$ К: 1 – этиленгликоль, 2 – диэтиленгликоль, 3 – триэтиленгликоль, 4 – пропиленгликоль, 5 – дипропиленгликоль, 6 – трипропиленгликоль.

наиболее конвективно неустойчивого компонента, в диапазоне значений времени от 1.5 до 10 мс. Небольшое отклонение (до 5% от масштаба изменения мощности на рис. 9) видно на кривой 3 при самом высоком значении T_{st} . В относительном варианте измерений вклад погрешности за счет неидеальности условий опыта значительно уменьшается и им можно пренебречь. При достаточно больших значениях Fo и T_{st} наблюдается откло-

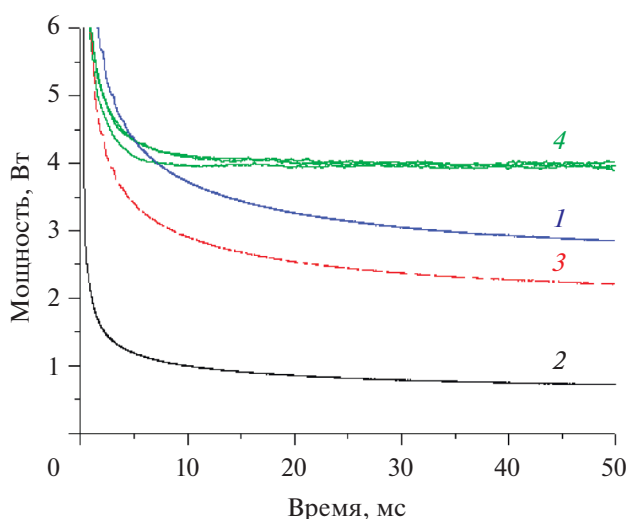


Рис. 11. Изменение во времени мощности, необходимой для термостабилизации зонда в водном растворе ППГ-425, при $p = 30$ МПа и $T_{st}(t) = 498$ К, $T_{st} - T_{НКТР} \approx 175$ К: 1 – вода, 2 – ППГ-425, 3 – расчет аддитивного значения для заданной концентрации, 4 – результаты трех последовательных опытов.

нение зависимостей (2) от линейного закона. Данная область изменения переменных лежит вне рамок данного обсуждения.

Во всей исследованной области температур обнаружено отрицательное отклонение интенсивности переноса тепла растворами от аддитивных значений. (Ранее подобный эффект для растворов с положительным объемом смешения был обсужден Л.П. Филипповым и С.Н. Кравчуном [3, 31].) Степень отклонения имеет нарастающий вдоль гомологического ряда характер и слабую температурную зависимость (см. рис. 8б). Подобный результат был получен и на водных растворах низкомолекулярных гомологов полипропиленгликоля (ППГ) (рис. 10). Накопленный опыт послужил практической основой для представленного ниже перехода к изучению растворов с ограниченной совместимостью компонентов.

В качестве первого шага был осуществлен опыт по термостабилизации зонда в растворе ППГ-425/вода, характеризующемся НКТР с параметрами $T_{НКТР}(p = 0.1 \text{ МПа}) \approx 423$ К [32]. Содержание ППГ составляло 30 мас. %. Чтобы снять ограничение по температуре сверху, накладываемое вскипанием, пробный опыт был проведен при закритическом давлении $p = 30$ МПа. Оценка критического давления раствора осуществлена по методике [33]. Нагрев сопровождался переводом системы в неустойчивые состояния, существенно перегреты относительно спинодали жидкость–жидкость (диффузионной спинодали). В некоторых температурно-временных условиях обнаружено превышение мгновенным коэффициентом теплоотдачи раствора соответствующего значения чистой (!) воды (рис. 11). Подобная средоточенность отклика во времени свойственна спиноподальному распаду, наиболее естественному в данной области фазовой диаграммы релаксационному процессу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В относительном варианте методики стабилизации температуры импульсно нагреваемого зонда с характерным временем в 10 мс сопоставлена теплоотдача к водным растворам гликолей во всем интервале составов растворов. Кратковременность нагрева позволила осуществить опыты не только в области абсолютно устойчивых состояний жидкости, но и в области относительно устойчивых состояний, перегреты выше температуры равновесия жидкость–пар. Обнаружено свойственное данному типу растворов отрицательное отклонение тепловой проводимости вдоль оси концентрации от аддитивного закона. Данный результат получен сопоставлением исключительно первичных данных опыта и не отягощен модельными ограничениями.

Показана принципиальная осуществимость измерений тепловых свойств водных растворов в случае их перегрева относительно линии равновесия жидкость—пар и жидкость—жидкость. Данный результат позволяет перейти к систематическому исследованию теплопереноса системами с двойной метастабильностью (выше линии НКТР и плавного продолжения бинодали жидкость—пар за эту линию), а также теплопереноса на фоне спиноподобного распада неустойчивых систем. Подобные системы имеют перспективу в качестве теплоносителей в процессах, где нельзя исключить вероятность мощного локального тепловыделения [34]. Развитие исследования будет направлено на выяснение обоснованности этой перспективы. В качестве первого шага будет осуществлен поиск зависимости времени жизни неустойчивой системы от глубины захода за спиноподобную и протяженности области несовместимости компонентов, ограниченной спиноподобием.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90075.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grigull U., Sandner H. Heat Conduction. Berlin: Springer, 1984. 187 p.
2. Станкус С.В., Хайруллин Р.А., Мартынец В.Г., Безверхий П.П. Исследования теплофизических свойств веществ и материалов в Новосибирском научном центре СО РАН в 2002–2012 гг. // ТВТ. 2013. Т. 51. № 5. С. 769.
3. Кравчун С.Н., Лунаев А.А. Метод периодического нагрева в экспериментальной теплофизике. Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2006. 208 с.
4. Skripov P.V., Skripov A.P. The Phenomenon of Superheat of Liquids: in Memory of Vladimir P. Skripov // Int. J. Thermophys. 2010. V. 31. № 4–5. P. 816.
5. Спиринов Г.Г. Измерение теплопроводности перегретых жидкостей // ИФЖ. 1978. Т. 35. № 3. С. 445.
6. Мулюков Р.Р., Павлов П.А. Экспериментальное исследование теплофизических свойств перегретого *n*-пентана // ТВТ. 1982. Т. 20. № 1. С. 49.
7. Буланов Н.В., Никитин Е.Д., Скрипов В.П. Теплопроводность жидкостей в метастабильном состоянии // ИФЖ. 1974. Т. 26. № 2. С. 204.
8. Гасанов Б.М. Ухудшение теплообмена при кипении эмульсий с низкокипящей дисперсной фазой // ТВТ. 2018. Т. 56. № 4. С. 585.
9. Yagov V.V., Zabirow A.R., Kaban'kov O.N., Minko M.V. Heat Transfer During Cooling of High Temperature Spheres in Subcooled Water at Different Pressures // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. V. 110. P. 219.
10. Волосников Д.В., Ефремов В.П., Скрипов П.В., Старостин А.А., Шишкин А.В. Экспериментальное исследование теплообмена в термонеустойчивых полимерных системах // ТВТ. 2006. Т. 44. № 3. С. 465.
11. Чудновский В.М., Майор А.Ю., Юсупов В.И., Жуков С.А. Лазероиндуцированное кипение биологических жидкостей // ТВТ. 2019. Т. 57. № 4. С. 578.
12. Решетников А.В., Мажейко Н.А., Скрипов В.П., Скоков В.Н., Коверда В.П. Реактивная отдача и пульсации давления с 1/ff-спектром мощности в условиях взрывного вскипания струй перегретой жидкости // ТВТ. 2002. Т. 50. № 5. С. 756.
13. Виноградов В.Е., Павлов П.А. Предельный перегрев растянутой жидкости // ТВТ. 2016. Т. 54. № 3. С. 360.
14. Philippov L.P., Nefedov S.N., Kravchoon S.N. The Investigation of Thermophysical Properties of Fluids by an Alternating Current Hot-wire Method // Int. J. Thermophys. 1980. V. 1. № 2. P. 141.
15. Starostin A.A., Skripov P.V., Altinbaev A.R. Pulse Heating as a Tool to Study the High-Temperature Properties of Unstable Liquids // Int. J. Thermophys. 1999. V. 20. № 3. P. 953.
16. Волосников Д.В., Сивцов А.В., Скрипов П.В., Старостин А.А. Метод управляемого импульсного нагрева для определения свойств короткоживущих жидкостей // ПТЭ. 2000. № 1. С. 146.
17. Скрипов П.В., Старостин А.А., Волосников Д.В. Перенос тепла в импульсно перегретых жидкостях // Докл. РАН. 2003. Т. 390. № 2. С. 192.
18. Sun T., Teja A.S.J. Density, Viscosity, and Thermal Conductivity of Aqueous Ethylene, Diethylene, and Triethylene Glycol Mixtures between 290 K and 450 K // J. Chem. Eng. Data. 2003. V. 48. P. 198.
19. Скрипов В.П., Файзуллин М.З. Фазовые переходы кристалл—жидкость—пар и термодинамическое подобие. Разд. 4.3. М.: Физматлит, 2003. 160 с.
20. Скрипов В.П., Скрипов А.В. Спиноподобный распад (фазовый переход с участием неустойчивых состояний) // УФН. 1979. Т. 128. № 6. Вып. 2. С. 193.
21. Volosnikov D.V., Povolotskiy I.I., Igolnikov A.A., Galkin D.A. Correlation of Thermal Resistance and Excess Volume for Superheated Aqueous Solutions of Glycols // IOP Conf. Ser.: J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1105. P. 012153.
22. Rutin S.B., Igolnikov A.A., Skripov P.V. High-power Heat Release in Supercritical Water: Insight into the Heat Transfer Deterioration Problem // J. Eng. Thermophys. 2020. V. 29. № 1. P. 67.
23. Rutin S.B., Volosnikov D.V., Skripov P.V. Heat Transfer under High-power Heating of Liquids. 3. Threshold Decrease of Heat Conduction in Supercritical Region // Int. J. Heat Mass Transfer. 2015. V. 91. P. 1.
24. Lukianov K.V., Kotov A.N., Starostin A.A., Skripov P.V. Heat Transfer Enhancement in Superheated Hydrocarbons with Traces of Water: the Effect of Pressure // Interfacial Phenom. Heat Transfer. 2019. V. 7. P. 283.
25. Афанасьев С.Ю., Жуков С.А., Ечмаев С.Б. Исследование теплообмена при недогретом пузырьковом кипении в условиях стабилизации температуры проволочного нагревателя // ТВТ. 1996. Т. 34. № 4. С. 583.
26. Ечмаев С.Б., Жуков С.А. Исследование устойчивости метастабильных состояний в условиях повторяющихся импульсных тепловых нагрузок // ТВТ. 2013. Т. 51. № 6. С. 958.

27. *Волосников Д.В., Рютин В.С., Скрипов П.В., Старостин А.А., Шишкин А.В.* Метод исследования характеристик теплопереноса в термонеустойчивых жидкостях // *Метастабильные состояния и фазовые переходы*. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. Вып. 5. С. 59.
28. *Ralph D.G., Teja A.S.J.* Thermal Conductivity of Poly(ethylene glycols) and Their Binary Mixtures // *J. Chem. Eng. Data*. 1990. V. 35. P. 117.
29. *Kozulin I.A., Kuznetsov V.V.* The Dynamics of Explosive Vaporization of a Two-component Liquid Mixture // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1359. P. 012052.
30. *Gurashkin A.L., Starostin A.A., Ermakov G.V., Skripov P.V.* Communication: High Speed Optical Investigations of a Character of Boiling-up Onset // *J. Chem. Phys.* 2012. V. 136. P. 021102.
31. *Филиппов Л.П., Кравчун С.Н.* О теплопроводности растворов жидкостей // *ЖФХ*. 1982. Т. 56. № 11. С. 2753.
32. *Firman P., Kahlweit M.* Phase Behavior of the Ternary System H₂O-oil-polypropyleneglycol (PPG) // *Colloid Polym. Sci.* 1986. V. 264. № 11. P. 936.
33. *Igolnikov A.A., Rutin S.B., Skripov P.V.* Short-term Comparison of Heat Conduction and Critical Parameters for Thermally Unstable Mixtures // *AIP Conf. Proc.* 2019. V. 2174. P. 020104.
34. *Ullmann A., Poesio P., Brauner N.* Enhancing Heat Transfer Rates by Inducing Liquid-Liquid Phase Separation: Applications and Modeling // *Interfacial Phenom. Heat Transfer*. 2015. V. 3. P. 41.