Теплофизический семинар под руководством П.В. Скрипова

2026 год
г. Екатеринбург, Россия

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

XV теплофизический семинар под руководством П.В. Скрипова, посвященный памяти Б.П. Жилкина

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

28 апреля 2026 года
г. Екатеринбург, Россия

Организаторы

XV теплофизического семинара под руководством П.В. Скрипова:

Институт теплофизики
Уральского отделения РАН

Уральский федеральный университет
имени первого Президента РФ Б.Н. Ельцина

Национальный комитет РАН
по теплофизическим свойствам

Теплофизический семинар под руководством П.В. Скрипова: Тезисы докладов
(2026 г. – Екатеринбург: ООО Универсальная Типография «Альфа Принт», 2026. – 72 стр.)

ISBN 978-5-9080775-9-0

Сборник содержит тезисы докладов Теплофизического семинара под руководством П.В. Скрипова.
Сборник может быть полезен студентам вузов, аспирантам и научным сотрудникам соответствующих специальностей.
Тезисы докладов печатаются в авторской редакции методом прямого репродуцирования с авторских оригиналов.

Институт теплофизики УрО РАН
Составление, 2026
Авторы, 2026
ISBN 978-5-9080775-9-0

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

XV теплофизического семинара
под руководством П.В. Скрипова

28 апреля 2026
г. Екатеринбург

EXTENDED ABSTRACTS

of the XV Seminar of under supervision
of P.V. Skripov

April 28, 2026
Yekaterinburg

Тезисы докладов XV теплофизического семинара под руководством П.В. Скрипова, посвященного памяти Бориса Прокопьевича Жилкина (24 апреля 1946 г. – 02 декабря 2021 г, г. Екатеринбург).

Основные направления работы семинара:

- ✓ Теплофизика топлив и рабочих тел;
- ✓ Механика жидкостей и газов
- ✓ Метастабильные состояния и флуктуационные явления;
- ✓ Интенсификация теплообмена.

Представлены тезисы докладов по газодинамике и теплоотдаче во впускных системах двигателях внутреннего сгорания, численным методам в тепловых процессах, вскипанию перегретой жидкости.

© Институт теплофизики УрО РАН
Уральский федеральный университет
имени первого Президента РФ Б.Н. Ельцина
Национальный комитет РАН
по теплофизическим свойствам.
Составление, 2026
© Авторы, 2026

Дорогие друзья и коллеги!

XV теплофизический семинар посвящен памяти Бориса Прокопьевича Жилкина.

Профессор Борис Прокопьевич Жилкин – доктор физико-математических наук, ученый, чьи исследования охватывают самые разные области современной теплофизики, газодинамики, диагностики и инженерных технологий. Его научная биография – это история о том, как глубокие фундаментальные знания находят применение в самых разных сферах: от энергетики до медицины.

Главный научный сотрудник
Института теплофизики УрО РАН,
Руководитель семинара

П.В. Скрипов

Л.В. Плотников

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620062, Екатеринбург, Мира, 19

НАУЧНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ ПРОФЕССОРА ЖИЛКИНА БОРИСА ПРОКОПЬЕВИЧА

В центре внимания работ Б.П. Жилкина были газовые потоки и струи – их структура, взаимодействие, вихреобразование. Он одним из первых в России начал применять тепловизионные методы для изучения турбулентных потоков, что позволило не только увидеть, но и количественно описать сложные процессы соударения прямоточных и закрученных струй [1, 2]. Благодаря этим исследованиям были установлены критерии существования различных режимов термомеханического взаимодействия, а также выявлены закономерности, которые сегодня используются при проектировании промышленных агрегатов.

Б.П. Жилкин не ограничивался только лабораторными экспериментами. Его интерес к тепловизионным технологиям привел к созданию новых методов диагностики турбулентных структур, а затем – к разработке способов обнаружения очагов пламени и повышения безопасности при пожарах [3]. Эти работы легли в основу целого направления по применению тепловизоров в экстремальных условиях, где традиционные методы не столь эффективны.

Особое место в его научной деятельности занимает волоконная оптика. Вместе с коллегами Б.П. Жилкин исследовал передачу инфракрасного излучения через световоды из твердых растворов галогенидов серебра. Эти материалы оказались перспективными для создания гибких ИК-световодов, которые можно использовать не только для передачи тепловой энергии, но и для бесконтактной термометрии, а также в медицинских и технических приложениях [4, 5].

Не менее значимы его работы по вейвлет-анализу и современным методам обработки оптической информации. Профессор Б.П. Жилкин показал, что новые математические подходы позволяют глубже понять структуру газовых факелов, выявить скрытые вихри и их эволюцию, что невозможно с помощью классических методов [6].

Но, пожалуй, самым ярким примером междисциплинарности его исследований стали медицинские приложения. Совместно с врачами Б.П. Жилкин разработал методы инфракрасной диагностики воспалительных заболеваний пародонта, которые позволяют выявлять болезнь на самой ранней стадии [7]. Его идеи легли в основу патентов на способы лечения пародонтита с помощью ультрафиолетового излучения и устройств для антибактериальной обработки труднодоступных участков полости рта.

Вклад профессора Б.П. Жилкина в науку не ограничивается только исследованиями и разработками. Он является автором и соавтором десятков патентов, создателем новых экспериментальных установок, наставником для большого количества молодых ученых. Его работы по газоструйным эжекторам, контактным теплообменным аппаратам, моделированию тепломеханических процессов в двигателях и системам автоматического управления сегодня востребованы в энергетике, машиностроении, пожарной безопасности и медицине [8].

Научный путь Б.П. Жилкина – это пример того, как фундаментальная наука, подкрепленная инженерной мыслью и смелостью к междисциплинарным исследованиям, способна менять мир к лучшему.

Список литературы

1. Жилкин Б.И., Сыромятников Н.И. О модели импактной газовой струи // Доклады Академии наук СССР. 1977. Т. 234. № 4. С. 784.
2. Гневанова Л.Е., Жилкин Б.П., Зыскин Б.И. и др. Некоторые особенности процесса смешения закрученных газовых струй и их систем с поперечным потоком // Теплоэнергетика. 1998. № 12. С. 44-47.
3. Жилкин Б.П., Зайков Н.С., Кисельников А.Ю. и др. Применение тепловизионного метода для обнаружения очагов пламенного горения // Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21. № 4. С. 38-40.
4. Шмыгалев А.С., Жилкин Б.П., Корсаков А.С. и др. Пропускание ИК-излучения световодами из твердых растворов галогенидов серебра // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. № 17. С. 1-8.
5. Salimgareev D.D., Lashova A.A., Shmygalev A.S., ye al. Influence of geometrical parameters on transmitting thermal radiation through silver halide fibers // Results in Physics. 2020. V. 16. A.n. 102994.
6. Дорж Д., Худяков П.Ю., Жилкин Б.П. Применение вейвлет-анализа для идентификации строения газовых факелов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2014. Т. 14. № 4. С. 5-10.
7. Саркисян Н.Г., Ронь Г.И., Мелкумян А.А., Жилкин Б.П., Плесняев Е.А. Способ инфракрасной диагностики воспалительных заболеваний пародонта // Пародонтология. 2015. Т. 20. № 4 (77). С. 20-23.
8. Plotnikov L.V., Zhilkin B.P. Specific aspects of the thermal and mechanic characteristics of pulsating gas flows in the intake system of a piston engine with a turbocharger system // Applied Thermal Engineering. 2019. V. 160. A.n. 114123.

L.V. Plotnikov

Ural Federal University, Russia, 620062, Yekaterinburg, Mira, 19

SCIENTIFIC ACHIEVEMENTS OF PROFESSOR BORIS PROKOPIEVICH ZHILKIN

УДК 536.423

К.А. Бусов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук,
620016, Екатеринбург, Амундсена, 107а

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ, УГЛА СРЕЗА И УГЛА НАКЛОНА КАНАЛА НА ВСКИПАНИЕ ЖИДКОСТИ

В данной работе представлено обобщение результатов экспериментальных исследований, посвященных изучению влияния геометрической формы короткого канала, угла среза насадка и угла его наклона на струю метастабильной (перегретой) жидкости.

Для проведения экспериментов использовался сосуд высокого давления, из которого происходило истечение предварительно нагретой жидкости через короткий канал. В качестве теплоносителя использовалась дистиллированная вода. Начальные условия в рабочей камере соответствовали линии фазового равновесия и изменялись в широких пределах (температурный интервал: T_s=110 – 310 °С, диапазон давлений: p_s=0.1 – 10 МПа).

При установке коротких каналов с различной геометрической формой их поперечного сечения (квадрат [1], полуцилиндр [2], овал [3]) подробно изучено изменение формы и угла раскрытия струи жидкости при различных степенях перегрева. Использование квадратного и полуцилиндрического каналов позволило выявить явление полного раскрытия струи, которое наблюдалось также при истечении перегретой жидкости через цилиндрический канал. В случае применения овального короткого канала развала струи жидкости обнаружено не было. Однако, было установлено, что форма вскипающей воды и угол раскрытия значительно зависят от ориентирования данного канала (подробнее об этом написано в работе [3]).

Из цикла работ, посвященных изучению влияния сопел с косым срезом на динамику вскипания перегретой жидкости, было установлено явление отклонения (до 18°) оси факела распыла относительно оси канала [4]. В экспериментах использовались цилиндрические каналы диаметром d=0.5 мм с углами среза α=30°, 45° и 60°.

Подробное изучение проведено касательно вопроса влияния наклона канала на динамику вскипания струи перегретой воды. Были изготовлены короткие цилиндрические каналы (длина l=1мм, диаметр d=0.4 мм) с углами наклона β=5°, 10° и 25°. В данном исследовании получены результаты как для условий истечения свободной струи, так и для случая течения жидкости через короткий канал, соединяющийся с сосудом высокого давления с помощью прижимного фланца. Благодаря

применению в предшествующих опытах данной детали было обнаружено явление радиального течения жидкости – полный развал потока [5]. Подобное раскрытие вскипающей струи жидкости наблюдалось только в случае использования цилиндрического канала под наклоном β=5°. При применении других наклонных цилиндрических каналов (β=10° и 25°) полный развал струи обнаружен не был. Однако, в случае использования двух последних каналов наблюдалось значительное отклонение угла факела распыления вскипающей воды от оси цилиндрического канала.

Список литературы

1. Бусов К. А., Мажейко Н. А. Вскипание струи перегретой воды при истечении через канал квадратного сечения // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59. №. 2. С. 316-320.
2. Busov K. A. The Effect of Boiling-Up on the Shape and Droplet Size of a Jet of Superheated Water Discharged Through a Semi-Cylindrical Nozzle // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2022. V. 136. 106199.
3. Busov K.A., Mazheiko N.A., Shurupov V.A. Flash Boiling of Water at Discharge through a Short Oval Nozzle // J. Engin. Thermophys. 2025. V. 34. № 3. P. 567–579.
4. Жилкин Б. П., Плотников Л. В., Кочев Н. С., Решетников А. В., Мажейко Н. А., Бусов К. А. Влияние угла выходного среза цилиндрического канала на формирование струй нагретого газа и перегретой жидкости // ТВТ. 2019. Т. 57. № 3. С. 431–436.
5. Исаев О. А., Неволин М. В., Скрипов В. П., Уткин С. А. Реакция струи вскипающей жидкости // ТВТ. 1988. Т. 26. №. 5. С. 1028-1030.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-01039, https://rscf.ru/project/25-29-01039/

K.A. Busov

Institute of Thermal Physics Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
Russia 620016 Yekaterinburg, Amundsena, 107a

INFLUENCE OF THE GEOMETRY OF THE CUTTING ANGLE AND THE ANGLE OF INCLINATION OF THE NOZZLE ON THE BOILING-UP OF LIQUIDS

This work was supported by the Russian Science Foundation (project no. 25-29-01039), https://rscf.ru/project/25-29-01039/

УДК 536.423

Д.В Волосников, П.В. Скрипов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук,
620016, Екатеринбург, Амундсена, 107а

ПЕРЕГРЕВ ВОДЫ В УСЛОВИЯХ ИМПУЛЬСНОГО ЛОКАЛЬНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ

Доклад посвящен изучению условий возникновения перегретых состояний воды и процессов теплообмена, сопровождающих распад и последующее вскипание воды при атмосферном давлении. История изучения свойств и поведения перегретой воды отражена в десятках монографий и сотнях статей. Начиная с проблем градуировки средств измерений [1] и заканчивая поиском теплоносителей для охлаждения термоядерных реакторов [2]. В кратком введении доклада основное внимание уделено методикам исследования теплообмена в случае локального тепловыделения [3], устройствам с малоразмерным тепловыделяющим элементом [4] и устройствам, работающим в режиме импульсного изотермического воздействия [5].

В качестве результата проведенных экспериментальных исследований представлены данные о тепловом потоке от микронагревателя диаметром 20 мкм в воду при термостабилизации нагревателя продолжительностью 1 с [6]. В диапазоне значений температур термостабилизации от 100 до 185°С выделены характерные интервалы температуры для четырех режимов теплоотдачи от микронагревателя в воду: кондуктивный режим (К), кондуктивно-конвективный (КК), режим спонтанного вскипания (СВ) и сверхинтенсивного теплообмена СИТ. Выделенным режимам теплоотдачи к воде соответствовали различные интервалы изменения тепловых потоков: для режимов К и КК от 0,2 до 0,5 кВт/см^2; для режима СВ – до 1 кВт/см^2 и для режима СИТ – 2,4 кВт/см^2, соответственно. Обсуждаемые измерения проведены в широкой области изменения температуры, включающей область спонтанного вскипания воды в заданных условиях опыта.

Полученные значения температур СВ находятся в согласии с данными работ [7, 8]; сведения о значениях теплового потока создают практическую основу разработки технологий распыления компонентов биотоплив [9].

Список литературы

1. Хвольсон О.Д. Курс физики. Т. 3 / О.Д. Хвольсон. – Берлин, 1923. – 752 с.
2. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость / В.П. Скрипов. – Москва: Наука, 1972. – 312 с.
3. Афанасьев С.Ю. Исследование теплообмена при недогретом пузырьковом кипении в условиях стабилизации температуры проволочного нагревателя / С.Ю. Афанасьев, С.А. Жуков, С.Б. Ечмаев // Теплофизика высоких температур. – 1996. – Т. 34. – № 4. – С. 583-589.
4. Чудновский В.М. Лазероиндуцированный режим сверхинтенсивного пузырькового кипения / В.М. Чудновский, В.И. Юсупов, С.А. Жуков, С.Б. Ечмаев, В.Н. Баграташвили // Доклады Академии Наук. – 2017. – № 5. – С. 533-535.
5. Sitdykov A.A. Heat-Transfer Coefficient to Pulsed Superheated Aqueous Solution of Boric Acid / A.A. Sitdykov, I.I. Povolotskiy, D.V. Volosnikov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2025. – Vol. 89. – № 11. – P. 2071-2077.
6. 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.
7. Павлов П.А. Кинетика зародышеобразования в перегретой воде / П.А. Павлов, Е.Д. Никитин // Теплофизика высоких температур. – 1980. – Т. 18. – № 2. – С. 354-358.
8. Решетников А.В. Неравновесные фазовые переходы в струе сильно перегретой воды / А.В. Решетников, Н.А. Мажейко, В.Н. Скоков, В.П. Коверда // Теплофизика высоких температур. – 2007. – Т. 45. – № 6. – С. 838-846.
9. Sazhin S.S. A new approach to modelling micro-explosions in composite droplets / S.S. Sazhin, T. Bar-Kohany, Z. Nissar, D. Antonov, P.A. Strizhak, O.D. Rybdylova // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – Vol. 161. – P. 120238.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-69-10006, https://rscf.ru/project/23-69-10006/

D.V. Volosnikov, P.V. Skripov

Institute of Thermal Physics Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
Russia 620016 Yekaterinburg Amundsena, 107a

SUPERHEATED OF WATER UNDER IMPULSE LOCAL HEAT TRANSFER

The investigation has been conducted at the expense of a grant of the Russian Science Foundation (project № 23-69-10006), https://rscf.ru/project/23-69-10006/

УДК 62-144.3

Л.В. Плотников[1], *В.А. Шурупов*[1,2], *Д.А. Давыдов*[1]

[1] Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620062, Екатеринбург, Мира, 19

[2] Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук, 620016, Екатеринбург, Амундсена, 107а

ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКА В ЦИЛИНДРЕ ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ В ПРОЦЕССЕ ВПУСКА

Поршневые двигатели (ДВС) широко распространены практически во всех отраслях народного хозяйства от бытовых нужд и транспорта до промышленных объектов и энергетики [1]. Поэтому улучшение их технических, экономических и экологических показателей остается важной и актуальной задачей для науки, техники и технологии. Совершенствование внутрицилиндровых процессов в тактах впуска и выпуска является действенным способом повышения эксплуатационных характеристик ДВС [2, 3].

Цель исследования состояла в изучении и совершенствовании структуры потока воздуха в цилиндре ДВС при его заполнении через впускную систему разной конфигурации посредством оптических методов. Применялись метод тепловизуализирующей съемки (ТВС) [4] и метод PIV (Particle Image Velocimetry).

В работе применялись профилированные элементы впускной системы: впускная труба и клапанный канал с поперечным сечением в форме квадрата и треугольника. Геометрия каналов выбиралась исходя из равенства эквивалентных гидравлических диаметров. Примеры термограмм (ТВС) и полей скоростей (PIV) показаны на рисунке 1.

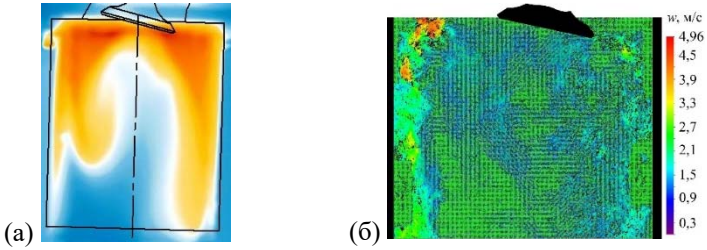

Рисунок 1 – Термограмма (а) структуры потока воздуха и поле скоростей (б) в цилиндре для базовой впускной системы при $w \approx 5$ м/с

Таким образом, основные результаты исследования состоят в следующем:

1. Проведен сравнительный анализ оптических методов для изучения структуры потока в цилиндре в процессе его заполнения воздухом в стационарном режиме;
2. Показано, что поперечное профилирование впускного трубопровода и клапанного канала вызывает существенную трансформацию структуры потока в цилиндре двигателя;
3. Применение профилирования элементов системы впуска вызывает формирование крупных вихрей в цилиндре двигателя, что способствует улучшению процессов смесеобразования и сгорания рабочего тела.

Полученные результаты потенциально могу быть использованы для уточнения методов расчета и проектирования впускных систем ДВС с перспективными эксплуатационными показателями.

Список литературы

1. Reitz R.D., Ogawa H., Payri R., Fansler T., et al. IJER editorial: The future of the internal combustion engine // Int. J. Engine Res. 2020. V. 21(1). P. 3–10.
2. Wang G., Yu W., Li X., Su Y., Yang R., Wu W. Study on dynamic characteristics of intake system and combustion of controllable intake swirl diesel engine // Energy. 2019. V. 180. P. 1008-1018.
3. Plotnikov L.V. Gas dynamics and heat exchange of stationary and pulsating air flows during cylinder filling process through different configurations of the cylinder head channel (applicable to piston engines) // Int. J. Heat Mass Transfer. 2024. V. 233. A.n. 126041.
4. Zhilkin B. P., Larionov I. D., Shuba A. N. Applications of an infrared imager for determining temperature fields in gas flows // Instruments and experimental techniques. 2004. V. 4. P. 545-546.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 26-29-20006), https://rscf.ru/project/26-29-20006/

L.V. Plotnikov[1], *V.A. Shurupov*[1,2], *D.A. Davydov*[1]

[1] Ural Federal University,
Russia, 620062, Yekaterinburg, Mira, 19
2 Institute of Thermal Physics Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
Russia, 620016, Yekaterinburg, Amundsena, 107a

GAS DYNAMIC IMPROVEMENT OF FLOW STRUCTURE IN A PISTON ENGINE CYLINDER DURING THE INTAKE PROCESS

The study was funded by a grant from the Russian Science Foundation № 26-29-20006), https://rscf.ru/project/26-29-20006/

УДК 536.242

А.А. Ситдыков, Д.В. Волосников

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук,
620016, Екатеринбург, Амундсена, 107а

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ В ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ НА ОСНОВЕ ВОДНОГО РАСТВОРА БОРНОЙ КИСЛОТЫ И АНТИКОРРОЗИОННЫХ ДОБАВОК

Российская атомная энергетика сегодня переживает этап активного технологического развития, включая строительство новых энергоблоков с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР), а также разработку перспективных проектов реакторных установок (РУ), таких как ВВЭР-ТОИ. Для корректного прогнозирования поведения установки в переходных и аварийных режимах, а также для проектирования систем безопасности на АЭС с ВВЭР, необходимы надёжные сведения о теплофизических свойствах теплоносителя первого контура и его отдельных компонентов в широких интервалах температур и давлений. Теплоноситель первого контура ВВЭР представляет собой химически сложный водный раствор. Помимо воды в состав теплоносителя входят борная кислота H_3BO_3, гидроксид калия KOH, аммиак NH_3 и гидразин-гидрат $N_2H_4{\cdot}2H_2O$ [1].

Цель данного исследования – выполнить экспериментальное моделирование теплоотдачи в условиях импульсного нагрева в теплоноситель первого контура ВВЭР и установить взаимосвязь между характеристиками теплоотдачи в образцы водного раствора и его компонентным составом в диапазоне рабочих температур и давлений.

Для моделирования теплоотдачи в теплоноситель в рамках данного исследования был выбран метод изотермического воздействия. Данный метод в относительном варианте использования позволяет с достаточной точностью определять изменения мгновенного коэффициента теплоотдачи $K_T = (P - P_{vac})\cdot(\Delta T \cdot S_w)^{-1}$ (где P_{vac} - мощность тепловыделения в зонде при разрежении в 660 Па, приближённая к условиям вакуума, $\Delta T = T_{st} - T_0$, S_w – площадь зонда) к водным растворам при варьировании состава образца [2-4]. Метод позволил провести адекватное моделирование тепловых процессов в реакторе ВВЭР при соответствующих сценариях и режимах работы реактора. В частности, в диапазоне температур импульсной термостабилизации образцов $T_{st}(t)$=100-330 °C при t = 0,1…100 мс (где t – длительность изотермического воздействия) и изобарических условиях в измерительной ячейке 0,1-16,2 МПа.

Было исследовано 9 образцов водного раствора борной кислоты (0-50 г/кг), по 4 образца водных растворов гидроксида калия, аммиака, гидразин-гидрата (0-100 мг/кг), а также 3 образца 5-и компонентного раствора (борная кислота 0-18 г/кг, гидроксида калия 30 мг/кг, гидразин-гидрата 20 мг/кг, аммиака 10 мг/кг). Наблюдается регистрируемое в опыте снижение значения коэффициента теплоотдачи раствора K_T при увеличении концентрации добавок относительно основного компонента (воды). Концентрационные зависимости коэффициента мгновенного теплоотдачи в исследованном диапазоне концентраций имеют близкий к линейному вид. Полученные результаты свидетельствуют о применимости метода для решения практических задач, связанных с особенностями эксплуатации ВВЭР в условиях импульсного изменения тепловой нагрузки и различных переходных режимах работы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-69-10006, https://rscf.ru/project/23-69-10006/

Список литературы

1. Рощектаев Б.М. Водно-химический режим АЭС с реакторами ВВЭР-1000 и РБМК-1000. М: НИЯУ МИФИ, 2010. 132 с.
2. Ситдыков А.А., Поволоцкий И.И., Волосников Д.В. Коэффициент теплоотдачи к импульсно перегретому раствору борной кислоты // Изв. РАН. Сер. физ. 2025., Т. 89, № 11. С. 27-34.
3. А.А. Губин, А.А. Марчукова, И.И. Поволоцкий, Д.В. Волосников, Обработка данных импульсного теплофизического эксперимента с помощью Python // Изв. РАН. Сер. физ.2024. Т. 88. № 9. С. 42-48.
4. Д.В. Волосников, И.И. Поволоцкий, А.А. Старостин и др. Теплоотдача к водным растворам гликолей в импульсно перегретых состояниях. ТВТ. 2021. Т.59. №2. С. 384–393.

A.A. Sitdykov, D.V. Volosnikov

Institute of Thermal Physics Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
Russia 620016 Yekaterinburg, Amundsena, 107a

EXPERIMENTAL MODELING OF HEAT TRANSFER TO A COOLANT BASED ON AN AQUEOUS SOLUTION OF BORIC ACID AND ANTI-CORROSION ADDITIVES

The investigation has been conducted at the expense of a grant of the Russian Science Foundation (project № 23-69-10006), https://rscf.ru/project/23-69-10006.

УДК 535.8

А.А. Старостин [1], *Е.М. Шлеймович* [2]

[1] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук,
620016, Екатеринбург, Амундсена, 107а
[2] Уральский федеральный университет им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина, 620002, Екатеринбург, Мира, 19

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ Б.П. ЖИЛКИНА

Основная научная деятельность Б.П. Жилкина была связана с применением и развитием методов визуализации температурных полей в газовых потоках, пламенах, аэрозолях, а также и в биологических объектах. Самые первые работы с проф. Н.И. Сыромятниковым по визуализации закручивающихся импактных струй были сделаны с успешным применением теневого метода Теплера вместо ранее применявшихся микровертушек [1]. Удалось доказать, что вихревой жгут высокой интенсивности, выходя на ламинарный подслой, разрушает его, подходя непосредственно к поверхности преграды, что и приводит к максимуму теплоотдачи в этой зоне. Последующее развитие работы связано с применением тепловизионной техники. Основные идеи подтверждены патентами и публикациями с многократным цитированием. Ключевая методическая находка была сделана с применением визуализирующей сетки [2]. Материал сетки и геометрия нитей были специально подобраны для минимального влияния на регистрируемое температурное поле. Этим методом исследовались турбулентные явления в спутных и встречных газовых потоках, что нашло отражение в публикациях и диссертациях под руководством Б.П. Жилкина. В многочисленных экспериментах исследователя привлекали внимание пульсации тепловизионной картины, считавшиеся случайными. Однако, большой объем получаемого экспериментального материала поспособствовал разработке метода частотно-временного анализа тепловизионных фильмов. Обнаружилось, что разные участки изображения пульсируют с разной частотой и несут новую информацию о структуре потоков. Метод был успешно применен к анализу факелов и пламени, рис.1, и их выделению на фоне других горячих объектов [3]. Найденные эффекты и закономерности послужили основой для применения и развития частотно-тепловизионной методики при решении практических задач в теплообменных устройствах, двигательных установках, а также при анализе биологических объектов и в медицинской диагностике.

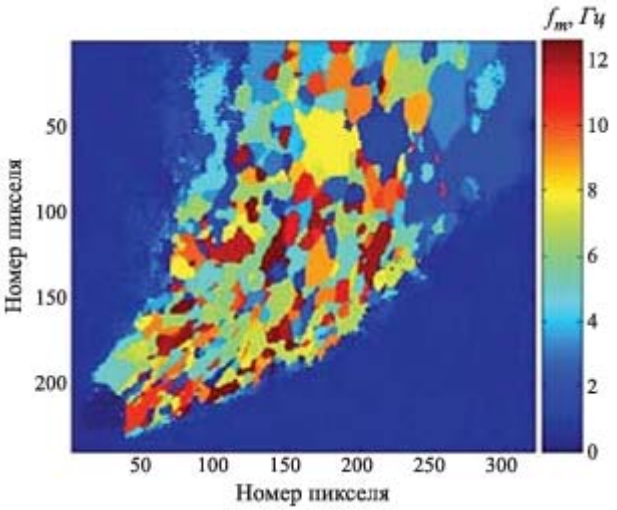

Рисунок 1 – Пример распределения частоты пульсаций f_m температуры в факеле

Список литературы

1. Б. П. Жилкин, Н. И. Сыромятников. О модели импактной газовой струи // Докл. АН СССР. 1977. Т. 234. №4. С.784–786.
2. Б. П. Жилкин, И. Д. Ларионов, А. Н. Шуба. Применение тепловизора для определения температурных полей газовых потоков // Приборы и техника эксперимента. 2004. №4. С. 126–127.
3. Жилкин Б. П., Зайков Н. С., Кисельников А. Ю., Худяков П. Ю., Алексеев С. Г. Применение тепловизионного метода для обнаружения очагов пламенного горения // Пожаровзрывобезопасность. 2012. №4. С.38-40.

A.A. Starostin [1], E.M. Shleymovich [2]

[1] Institute of Thermal Physics Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
Russia 620016 Yekaterinburg, Amundsena, 107a
[2] Ural Federal University,
Russia, 620002, Yekaterinburg, Mira, 19

OPTICAL METHODS IN THERMOPHYSICAL RESEARCH BY B.P. ZHILKIN

XVI теплофизический семинар под руководством П.В. Скрипова, посвященный 95-летию Яна Зенгерса

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

28 – 30 мая 2026 года
г. Екатеринбург, Россия

Организаторы

XVI теплофизического семинара под руководством П.В. Скрипова:

Институт теплофизики
Уральского отделения РАН

Объединенный ученый совет
по физико-техническим наукам УрО РАН

Дагестанский государственный университет

Национальный комитет РАН
по теплофизическим свойствам

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

XVI теплофизического семинара
под руководством П.В. Скрипова

28 – 30 мая 2026
г. Екатеринбург

EXTENDED ABSTRACTS

of the XVI Seminar of under supervision
of P.V. Skripov

May 28 – 30, 2026
Yekaterinburg

Тезисы докладов XVI теплофизического семинара под руководством П.В. Скрипова, посвященного 95-летию Яна Зенгерса.

Основные направления работы семинара:

- ✓ Фазовые переходы и критические явления;
- ✓ Материалы при импульсных воздействиях.

Представлены тезисы докладов по фазовым переходам, в том числе в гетерогенных веществах, критическим явлениям и свойствам многокомпонентных сплавов.

© Институт теплофизики УрО РАН
Объединенный ученый совет
по физико-техническим наукам УрО РАН
Дагестанский государственный университет
Национальный комитет РАН
по теплофизическим свойствам.
Составление, 2026
© Авторы, 2026

Дорогие друзья и коллеги!

XVI теплофизический семинар посвящен 95-летию Яна Зенгерса (Jan Sengers), 1931 г. рождения (Нидерланды), с 1952 по 1962 гг. работал в ван-дер-Ваальсовской лаборатории Амстердамского университета. Под руководством A.J.F.M. Michels защитил диссертацию (1962 г.) на тему “Thermal conductivity measurements at elevated gas densities including the critical region”. В 1963 г. вместе с женой Anneke Levelt (см. подробнее в ссылке https://doi.org/10.1073/pnas.241585121) начал работать в Национальном бюро стандартов NBS, сегодня Национальный институт стандартов и технологий NIST (США). С 1968 г. Зенгерс работает в Мэрилендском университете. Его научные достижения касаются исследований критического поведения жидкостей, теплопроводности флюидов в критической области, зависимости транспортных свойств от плотности, кроссоверной теории критических явлений, теплофизических свойств жидкостей, включая воду и водяной пар, см. подробнее в ссылке https://doi.org/10.1007/s10765-020-02696-7.

Главный научный сотрудник
Института теплофизики УрО РАН,
Руководитель семинара

П.В. Скрипов

УДК 536.423.18

Jan. V. Sengers

Institute for Physical Science and Technology
University of Maryland, College Park, MD 20742, USA

FIFTY YEARS OF COLLABORATION ON THERMOPHYSICAL PROPERTIES WITH RUSSIAN SCIENTISTS

1 Early History

Having obtained our Ph.D.'s at the University of Amsterdam, my wife Anneke Levelt Sengers and I started working as scientists at the National Bureau of Standards (NBS) in the United States in December 1963. My wife stayed at NBS, now the National Institute of Standards and Technology (NIST), where she became an internationally recognized scientist. I moved to the University of Maryland (UMD) in 1968, while continuing a professional association with NIST. Initially at NIST, I had the privilege of working as a physicist in the Statistical Physics Section headed by Melville S. Green. Mel Green organized the first International Conference on Critical Phenomena, held in 1965 in Washington, DC [1]. This historic conference was attended by 187 scientists from all over the world, but without any scientist from the Soviet Union. At that time professional interactions between the US and the Soviet Union in my field of statistical physics were nonexistent.

Shortly after my arrival in the US in 1963, I was recruited by Professor Joseph Kestin to assist him in preparing the Proceedings of an International Seminar on Transport Properties of Gases held at Brown University in 1964. Joseph Kestin became my mentor in Engineering, and it was through Joseph Kestin that I got in touch with Russian scientists. During the 20th century the need for standardization of the thermophysical properties of water and steam for technology and scientific applications had become evident. Efforts to standardize the thermophysical properties of water and steam had been coordinated by a series of international conferences until 1968, after which the International Association for the Properties of Steam (IAPS) was established for the purpose. An ASME Committee for the Properties of Steam functioned as the US National Committee for IAPS. In 1974 it became desirable not only to extend the formulations to larger ranges of pressures and densities, but also to incorporate new scientific developments. Anneke Levelt Sengers and Sandra Greer had shown that steam exhibits the same non-analytic critical behavior as had been found for non-polar fluids [2]. Even more seriously, the large increase of the thermal conductivity that I had found in my Ph.D. research for carbon dioxide [3, 4], a phenomenon subsequently confirmed for steam [5, 6], had been completely ignored in the Skeleton Tables for the Transport Properties of Steam adopted in 1964 [7]. For these reasons Kestin asked both

Anneke and me to join the ASME Committee for the Properties of Steam in 1974. As a result, Anneke and I attended the 8th Internal Conference on the Properties of Steam, held in Giens, France in the fall of 1974, where I met a delegation from the USSR consisting of N.A. Agaev, A.A. Aleksandrov, A.A. Tarzimanov, and N.V. Tsederberg [8]. In addition, a paper of Rivkin et al. on the first measurements of the viscosity of steam near the critical point was presented [9], and an abstract of the work of Sirota et al. on the thermal conductivity of steam in the critical region [5]. At this conference a Special Committee was established for developing updated interpolating equations for the transport properties of water substance with J. Kestin as Chair and with representatives from the Federal Republic of Germany, France, Japan, the United Kingdom, the USA, and the USSR. This special committee met subsequently in Schliersee, Germany in April 1975, in Ottawa, Canada, in September 1975, in Kyoto, Japan, September 1976, in Providence, RI, USA, in May 1977, and finally in Moscow, in September 1977. Based on the recommendations of the Special Committee, IAPS issued a document entitled "Release on Dynamic Viscosity of Water Substance in 1975 [10], and a document entitled "Release on Thermal Conductivity of Water Substance" in 1977 [11]. A complete list of primary experimental data had been collected by a research group of the Technical University Munich [12, 13]. The formulation for the viscosity was based on an equation developed by Aleksandrov et al. of the Moscow Power Institute [14]. The correlating equation for thermal conductivity contained contributions from Aleksandrov and Matveev of the Moscow Power Institute [15], from Watson of the Engineering Laboratory in the UK [11], and from Basu and Sengers of the University of Maryland [11], a beautiful example of an international collaboration.

2 Exchange Visits

My wife and I attended the annual meeting of IAPS in Moscow in 1977. This was our first visit to the USSR, where I met several Soviet scientists, especially from the Moscow Power Institute. Of particular interest for me was meeting with S.L. Rivkin [9] who had measured the viscosity of steam and with A.M. Sirota [5] who had measured the thermal conductivity of steam in a large range of temperatures and densities steam, including in its critical region. Sirota had been inspired by my Ph.D. dissertation which had shown that the thermal conductivity of carbon dioxide diverges at the critical point [4]. For his experiments, he had collected photographs of every page of my dissertation [3]. In addition, as mentioned in Section 1, the Special Committee for Transport Properties of Water and Steam concluded its work on the thermal conductivity of water and steam at this meeting in Moscow [11]. Unfortunately, the Soviet Union was still a closed society and social contacts between foreigners and Soviet scientists were strongly discouraged at that time.

In the 1980's opportunities for interactions between Soviet and US scientists began to increase. The initiative came from the International Research

and Exchanges Board (IREX). IREX, a nonprofit organization, was created to bridge geopolitical divides by fostering exchanges of people between different countries. The first Russian scientist who visited me at the University of Maryland was Oleg Tsvetkov from the Leningrad Technological Institute for Refrigeration in May 1980. The actual purpose of his trip to the US was visiting Joseph Kestin at Brown University. When Kestin informed Tsvetkov about the work of my research group at the University of Maryland, Tsvetkov decided to visit me before flying back to the USSR from Washington, DC. He came a second time in the spring of 1988, when I was still interacting closely with Kestin on viscometry [4].

A major improvement in the interaction with Russian scientists occurred when Anneke and I attended the 10th International Conference on the Properties of Steam organized by IAPS in Moscow in 1984. The conference was attended by 68 scientists from the Soviet Union, and I knew many of them from the literature. I specifically want to mention three scientists who, in addition to Oleg Tsvetkov, became life-long friends. The first was Mikhail Anisimov who was Chair of the Department of Physics of the Gubkin Academy for Oil and Gas, a technical university in Moscow. Anneke and I were even invited in the apartment of Anisimov. The second important contact person was Boris Grigoriev, who at that time was head of the Grozny Petroleum Institute in the Autonomous Republic of Checheno-Ingushetia. The third important contact person was Ilmutdin Abdulagatov, who worked at the Institute of Physics of the Dagestan Branch of the USSR Academy of Sciences in Makhachkala. Anisimov, Grigoriev, and Abdulagatov knew each other well as they were all involved in thermophysical-properties research.

Boris Grigoriev sent one of his graduate students, Djamaldin Kurumov, on an IREX Grant in 1986/1987 to become familiar with the modern theory of scaling for thermodynamic properties of fluids in the critical region [16]. Subsequently, Grigoriev himself spent some time with me at the University of Maryland to become familiar with research in the US. Specifically, I helped him preparing some publications for the International Journal of Thermophysics [17, 18], of which I was a co-editor at that time [4]. I also had him enrolled in a program at the University of Maryland for foreigners to become familiar with the English language. Furthermore, I helped him visiting several major universities and research centers in Delaware, Texas, and Colorado, including NIST in Boulder. This experience was an eye opener for Grigoriev about which he has written a detailed account [19, 20].

Shortly thereafter, Mikhail Gorbachev became head of the communist party in the USSR launching perestroika (restructuring) and glasnost (openness) leading to an end of the communist regime in 1990-1991. It increased the opportunities for Russian scientists to visit the US through programs like IREX. Because of the contacts I had already established, I received a travel grant from the US National Research Council to explore the possibilities for US-USSR collaboration in thermophysical properties of fluids. Specifically,

I received approval to visit in 1990 the Institute for Oil and Gas Research of the USSR Academy in Moscow, the Grozny Petroleum Institute in Chechen-Ingushetia, the Dagestan Branch of the USSR Academy of Sciences in Makhachkala, and the Institute for Refrigeration in Leningrad. Mikhail Anisimov was my host in Moscow, where I also interacted with the research group of Sergei Kiselev [21]. In Moscow I also visited the Institute for High Temperatures (IVTAN) hosted by Marina Serednitskaya and the Institute of General and Inorganic Chemistry, hosted by Vladimir Valyashko. Boris Grigoriev was my host in Grozny [22], and Ilmutdin Abdulagatov and Ibragimkhan Kamilov were my hosts in Makhachkala. Oleg Tsvetkov was my host in Leningrad. This was my third meeting with Tsvetkov, and we had not only scientific but also intimate personal conversations. During my stay in Leningrad, I was also able to visit the light-scattering laboratory of Leonid Zubkov and Vladimir Romanov at the Institute of Physics of the Leningrad State University in Petrodvorets. In addition, Anisimov arranged a trip for me and his research group to Georgia, where with the help of Gudja Garsevanishvili, who was working with Anisimov at that time, we visited the Department of Physics of the Georgean Polytechnic Institute in Tbilisi and had a little vacation in one of the wine areas in Georgia. All visits were rather dramatic as the USSR were going through profound cultural and economic changes. At several places I was the first American visitor in human memory. I kept a diary describing my experiences which I recently turned into a book [23].

After my visit to the USSR in 1990, Mikhail Anisimov and Kiselev from the Moscow Oil and Gas Institute, Boris Grigoriev and Boris Nemzer from the Grozny Petroleum Institute, and Ilmutdin Abudulagatov from the Institute of Physics in Makhachkala visited the University of Maryland briefly in 1991. Specifically, Mikhail Anisimov, Sergei Kielev, Boris Grigoriev, with his postgraduate student Boris Nemzer, attended a symposium for my 60th birthday in 1991. On the same occasion, I organized a party in my country estate in West Virginia which was also attended by my Russian guests.

In 1991 I received a grant from the US-USSR collaboration in the Field of Basic Scientific Research of the US National Science Foundation (NSF) with Mikhail Anisimov as my Co-Principal Investigator representing the Institute for Oil and Gas Research of the USSR Academy of Sciences.

In November 1991 I returned to Moscow for two weeks to embark formally on the joint program. The political and economic situation had become even more precarious than during my previous visit. In 1990 I had interacted with Boris Grigoriev and his student Boris Nemzer on the surface tension of some normal alkanes [24]. This time, Grigoriev had to flee Grozny with his family without being able to take any of his possessions to Moscow [23]. Despite the upheaval, Anisimov, Kiselev and I were able to make some progress on our joint research project [25]. I also reviewed, discussed, and edited two papers of the research group of Anisimov for the International Journal of Thermophysics [26, 27]. To further implement the joint research, it was

agreed that Kiselev would spend one year as a postdoc at the University of Maryland starting in March 1992 [28, 29]. As part of the joint research project, Anisimov would come as a Visiting Scientist to the University of Maryland. Two other senior researchers, namely Evgenii Gorodetskii [27, 30-35], the primary theorist at the Moscow Oil and Gas Institute and Igor Yudin, head of the light scattering laboratory also became active participants in the joint research program [36-39]. Gorodetskii and Kiselev died in 2015 [40].

My stay in Moscow in 1991 had been supported by the grant from the NSF office for collaboration of the US with the USSR. By the time I would submit my final report, it had become the NSF office for collaboration between the US and the former Soviet Union. Scientific information related to this grant can be found in refs. [24, 25, 28-31, 41].

My next visit to Russia occurred in September 1992. However, the purpose of this visit was not to work on the joint project with the Oil and Gas Research Institute in Moscow, but to attend a meeting of the International Association for the Properties of Water and Steam (IAWPS) in Sankt Petersburg, the new but in fact the old name for Leningrad. As my wife Anneke was President of IAPWS we travelled together, first staying a few days in Moscow visiting Anisimov and then travelling to Sankt Petersburg. Unfortunately, shortly after my arrival in Sankt Petersburg I was diagnosed with erysipelas in my right food caused by streptococcus bacteria, and I ended up in a hospital for the remainder of my stay in Sankt Petersburg. I asked to be released from the hospital on the last day before my scheduled departure. They informed me that my release from the hospital would be premature, but they did relent upon my insistence. After my release from the hospital, Anneke and I spent the evening with my friend Oleg Tsvetkov and his family [23].

Mikhail Anisimov spent two years with me at the University of Maryland as a Visiting Scientist in 1994-1995, but in 1996 he came to join my research group at the University of Maryland permanently. After my retirement as Chair of the Department of Chemical Engineering in 1999, Anisimov succeeded me as a professor while I continued collaborating as professor emeritus. While working at the University of Maryland, Anisimov continued a strong connection with the Oil and Gas Institute in Moscow, thus benefitting his home country also. Specifically, he enabled several students from Russia to become involved in research at the University of Maryland: Habsat Abdulkadirova [42-44], Vakhtang Agayan [33, 34, 36, 45-48], Victor Dechabo [37], Slava Kulikov [30-32, 49], and Andrei Povodyrev [32, 33, 49-56] from Russia, and Dimitri Ivanov [39] from Belarus. Furthermore, we had a very productivity collaboration with Andrei Kostko [38, 57-61] from the Department of Food Biotechnologies and Engineering at the ITMO University in Sankt Petersburg, which is the current name of the previous Leningrad Institute for Refrigeration which I visited in 1990.

In 2015, I saw Boris Grigoriev again at the 19th Symposium on Thermophysical Properties, held in Boulder, where Mikhail Anisimov received the

Touloukian Award from the ASME [19, 20]. In 2015 I was also an Honorary Member of the Organizing Committee of an International Symposium on "Phase Transitions and Critical Phenomena", dedicated to the 80th birthday of I.K. Kamilov, Makhachkala, Dagestan. A Russia-US Workshop entitled "Phase Transitions in Fluids and Plasma", organized by Genri E. Norman of the Joint Institute for High Temperaturs of the Russian Academy of Sciences and by Mikhail A. Anisimov, was held at the University of Maryland in the spring of 2016. In September 2016, I went to Moscow to give an invited lecture at an International Conference on "Phase Transitions in Hydrocarbon Fluids: Theory and Experiments", held at the Gubkin State University of Oil and Gas, where I met with many Russian colleagues. On that occasion Grigoriev organized an excursion to a famous monastery outside Moscow. In 2021 a conference was held at the Research Institute of GAZPROM in Moscow celebrating the 80th birthday of Boris Grigoriev. My colleague, Mikhail Ansisimov, presented a joint paper at this conference [62], while I was able to attend this conference via the internet.

3 Some Joint Research Accomplishments

The joint research has been primarily concerned with theoretical and experimental studies of the critical behavior of thermodynamic and transport properties in simple and complex fluids and fluid mixtures and solutions. The isochoric heat capacity diverges at the critical point as first discovered in argon by A.V. Voronel and his students, M.I. Bagatskii and V.G. Gusak in the USSR, and the thermal conductivity diverges at the critical point as first discovered in carbon dioxide when I was a graduate student of A.M.J.F. (Teun) Michels in The Netherlands [4], discoveries subsequently confirmed by many other researchers. The importance of these discoveries has been highlighted by my colleague Mikhail Anisimov [63]. When I met Anisimov in 1990, thermodynamic and transport properties were known to obey asymptotically close to the critical point scaling behavior with universal asymptotic critical exponents. After the experimental confirmation of universality of asymptotic critical behavior, many of my colleagues considered the problem of critical behavior solved. However, I realized that for the theory to have real practical consequences, we needed to solve also the non-asymptotic critical behavior including the crossover to mean-field critical behavior further away from the critical point, as already had been pointed out by Peter Debye at the critical phenomena conference in 1965 [1, 4]. With the help of some graduate students, we were able to construct at the University of Maryland a thermodynamic Helmholtz-energy description that included crossover from singular critical to classical thermodynamic behavior of fluids [64, 65] which we subsequently extended to mixtures [66]. When I visited Moscow in 1990 Kiselev and coworkers were working on a somewhat more empirical approach to this problem [21]. Our approach was based on an approximate solution of the newly developed renormalization-group theory of critical phenomena. When

I informed Anisimov about this development in 1990, he became very interested in the approach that we had initiated. He and his Russian students greatly contributed to the further exploration of the physical significance and applications to fluids [25, 48, 49] fluid mixtures [49, 50], ionic solutions [47, 51, 53, 54, 56], and polymer solutions [35, 37, 38, 52, 54, 55]. We were able to demonstrate that our crossover theory gives an accurate representation of the susceptibility of the three-dimensional Ising model without any adjustable parameters [45, 67]. In collaboration with Evgenii Gorodestskii we also elucidated the crossover between vapor-liquid and liquid-liquid critical phenomena [30-32]. In addition, we made a detailed theoretical analysis of dynamic light scattering in mixtures near the critical point. In near-critical mixtures there are two diffusive modes which depend in a non-trivial way on the mass and thermal diffusivity [33]. We have suggested an interesting application for microrheological information in complex fluids [59].

The light-scattering facility developed by Yudin and coworkers in Moscow [36], was primarily used to study critical phenomena in polymer solutions [37, 38]. The subject was also investigated theoretically [35, 52, 54, 55]. Our crossover theory contains two parameters: a coupling constant and a cutoff parameter. The coupling constant accounts for a crossover from Ising-like critical behavior to mean-fiend critical behavior, and the cutoff parameter accounts for a crossover to tricritical behavior [68]. Combined with extensive light-scattering experiments conducted by Andrei Kostko, we were able to resolve completely the nature of both the static and dynamic crossover in polymer solutions [38, 57, 58, 61]. For the current status of this subject the reader is referred to a recent review [69]. We have also studied experimentally critical behavior in some aqueous solution [46, 47, 60]. The work with Boris Grigoriev was concerned with the temperature dependence of the surface tension of hydrocarbons [24].

We have confirmed the validity of our crossover equations for the thermodynamic properties of H2O and D2O and their mixtures in the critical region [42, 43]. Unfortunately, the current international formulations for the thermodynamic properties of H2O and D2O, adopted by IAPWS, are still not consistent with the theoretically predicted nonanalytic behavior, a problem which will need to be addressed in the future [70, 71]. Under the direction of Mikhail Anisimov, we formulated an equation of state for supercooled water [72] which was adopted by IAPWS as a guideline in 2015.

At the University of Maryland, we had earlier developed crossover equations for the viscosity [73] and thermal conductivity of fluids [74, 75] which incorporate the non-analytic critical behavior of these transport properties as predicted by the mode-coupling theory for critical dynamics. A practical procedure for combining this crossover model with a generalized corresponding state approach for many molecular fluids was also proposed, when Abdulagatov was a visiting scientist at NIST in Boulder [76]. It is interesting to note that the experimental observations for the divergent behavior of the viscosity

and thermal conductivity near the critical point of steam mentioned in Section 1 have turned out to agree with these crossover theories [77, 78]. A review of crossover equations to account for the effect of critical fluctuations on the thermodynamic and transport properties of fluids has recently been presented by Adulagatov and coworkers [79].

4 Reflections of Gratitude

In the introduction to my recent autobiography, I wrote: "Our life is a gift, our talents are gifts, and, yes, our accomplishments are gifts [80]. These gifts are to be shared with each other so that we can contribute to society much more than each of us individually. This paper is meant as a story of gratitude for having greatly benefitted from the professional and interpersonal interactions with so many Russian scientists.

In addition, I mention that I received a laudatio from Ibragimkhan Kamilov and Ilmutdin Abdulagatov from the Institute of Physics in Dagestan on the occasion of my 60th birthday [23]. In 2002 I was elected as an Academician Emeritus of the International Academy of Refrigeration (Russian Federation's Branch) after having been nominated by Oleg Tsvetkov [23].

My wife, Anneke Levelt Sengers, was an international recognized scholar in critical phenomena [81]. A keynote lecture in her memory [82], was presented by Pavel Skripov from the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences at the 2024 international conference on supercritical CO2 power cycle and comprehend energy systems in Shanghai, China (Fig. 1). On another occasion Pavel Skripov gave a lecture honoring me (Fig. 2). To typify the nature of the personal relationships, I should mention that humor has also been part of our interactions. Figure 3 shows a plot of the thermal conductivity of CO2 as a function of density close to the critical point from the data in my Ph.D. thesis. At that time, I was allowed to smoke cigars in the Van der Waals Laboratory [63]. At the conference in Moscow in 2016, Pavel Skripov presented a cartoon, showing me in the laboratory producing a similar graph from cigar smoke (Fig. 4).

Acknowledgments

The author gratefully acknowledges inspiring interactions with Ilmutdin Abdulagatov, Habsat Abdulkadirova, Vakhtang Agayan, Mikhail Anisimov, Evgenii Gorodetskii (deceased), Boris Grigoriev, Ibragimkhan Kamilov, Djamaldin Kurumov, Sergei Kiselev (deceased), Boris Nemzer, Gudja Garsevanishvili, Andrei Povodyrev, Pavel Skripov, Oleg Tsvetkov and Igor Yudin. Mikhail Anisimov gave me valuable comments on an earlier draft of the manuscript.

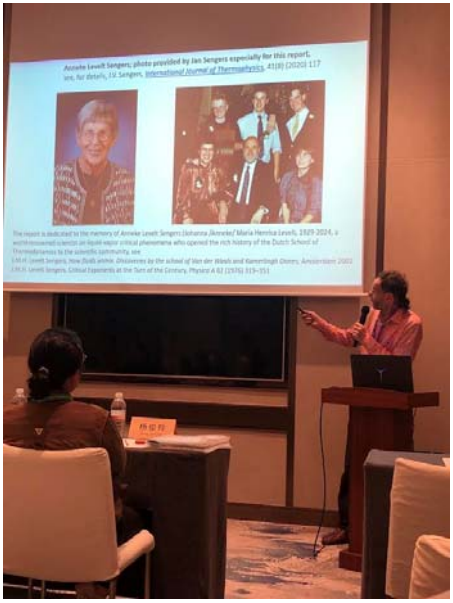

Figure 1 – Keynote lecture of Pavel Skripov at the ICSPC conference in. Shanghai, China

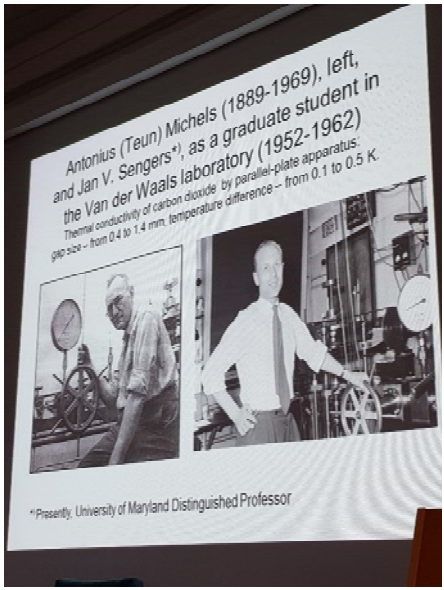

Figure 2 – Lecture presented by Pavel Skripov featuring Jan V. Sengers

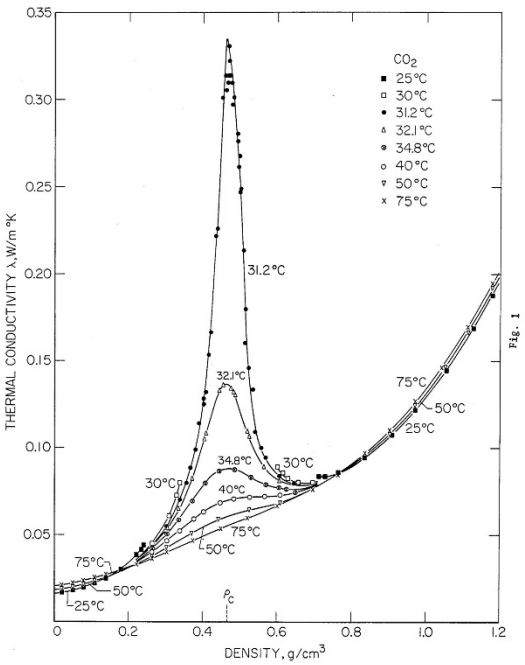

Figure 3 – Thermal conductivity of carbon dioxide as a function of density at temperatures near the critical temperature

Figure 4 – Cartoon made by Pavel Skripov showing Jan Sengers smoking a cigar in the Van der Waals Laboratory of the University of Amsterdam

References

1. M.S. Green and J.V. Sengers, eds., *Critical Phenomena, Proceedings of a Conference*, NBS Miscellaneous Publ. **273**, (U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1966), 242pp. (Accessible at https://www.aip.org/library).
2. J.M. H. Levelt Sengers and S.C. Greer, *Thermodynamic anomalies near the critical point of steam*, International Journal of Heat and Mass Transfer **15**, 1865 (1972).
3. J.V. Sengers, Thermal conductivity measurements at elevated gas densities including the critical region, (Ph.D. thesis, Van der Waals Laboratory, University of Amsterdam, 1962), 126pp. (Accessible at https://www.aip.org/library).
4. J. V. Sengers, *Encountering surprises in thermophysics*, International Journal of Thermophysics **41**: 117 (2020).
5. A.M. Sirota, V.I. Latunin, and G.M. Belyaeva. Teploenergetika **20**(8), 6 (1973) [Thermal Engineering **20**(8), 7 (1973).
6. B. Le Neindre, R. Tufeu, P. Bury, and J.V. Sengers, *Thermal conductivity of carbon dioxide and steam in the supercritical region*, Berichte der Bundesgesellschaft für Physikalische Chemie **77**, 262 (1973).
7. J. Kestin and J.H. Whitelaw, *Sixth International Conference on the Properties of Steam – Transport Properties of Water Substance*, Journal of Engineering for Power, Transactions ASME **87**, 82 (1966).
8. P. Bury, H. Perdon, and B. Vodar, eds., *Proceedings of the 8th International Conference on the Properties of Water and Steam*, (Editions Européennes Thermiques et Industries, Paris, 1975).
9. S.L. Rivkin, A.Ya. Levin, and L.B. Izrailevsky, and K.G.Kharitonov, in Ref. 8, pp. 153-162.
10. A. Nagashima, *Viscosity of water substance–New international formulation and its background*, Journal of Physical and Chemical Reference Data **6**, 1133 (1977); **7**, 1755 (1978), **12**, 403 (1983).
11. J.V. Sengers, J.T.R. Watson, R.S. Basu, B. Kamgar-Parsi, and R.C. Hendricks, *Representative equations for the thermal conductivity of water substance*, Journal of Physical and Chemical Reference Data **13**, 893 (1984).
12. K. Scheffler, M. Rosner, and M. Reimann, *Available Input for the Dynamic Viscosity of Water Substance* (Institut für Thermodynamik, Technische Universität München, 1974).
13. K. Scheffler, M. Rosner, and M. Reimann, *Available Input for the Thermal Conductivity of Water Substance* (Institut für Thermodynamik, Technische Universität München, 1974 and revised in 1977).
14. A.A. Aleksandrov, A.I. Ivanov, and A.B. Matveev, Teploenergetika **22**(4), 59 (1975) [Thermal Engineering **22**(4), 77 (1975).
15. A.A. Aleksandrov and A.B. Matveev, Teploenergetika **25**(8), 80 (1978) [Thermal Engineering **25**(8), 58 (1978).
16. D.S. Kurumov, G.A. Olchowy, and J.V. Sengers, *Thermodynamic properties of methane in the critical region*, International Journal of Thermophysics **9**, 73 (1988).
17. B.A. Grigoryev, *Research on thermophysical properties of fluids at the Grozny Petroleum Institute (USSR),* International Journal of Thermophysics **11**, 239 (1990).
18. B.A. Grigoriev, Yu.L. Rastorguyev, D.S. Kurumov, A.A. Gerasimov, V.E, Kharin, and S.L. Plotnikov, *Thermodynamic properties of n-pentane*, International Journal of Thermophysics **11**, 487 (1990).

19. B.A. Grigoriev, *Notes of a Thermophysicist, Part I Grozny Petroleum Institute 1963-1991* (Moscow, 2022, in Russian).
20. B.A. Grigoriev, *Notes of a Thermophysicist, Part I Grozny, 1963-1991* (Accessible at https://www.aip.org/library).
21. S.B. Kiselev, I.G. Kostyukova, and A.A. Povodyrev, *Universal crossover behavior of fluids and fluid mixtures in the critical region*, International Journal of Thermophysics **12**, 877 (1991).
22. D.S. Kurumov and B.A. Grigoriev*, A generalized scaled equation of state for n-alkanes (methane to n-nonane) in the critical region*, International Journal of Thermophysics **12**, 549 (1991).
23. Jan V. Sengers, *My visits to Russia as a scientist 1990 - 1992* (Accessible at https://www.aip.org/library)
24. B.A. Grigoriev, B.V. Nemzer, D.S. Kurumov, and J.V. Sengers, *Surface tension of normal pentane, hexane, heptane, and octane*, International Journal of Thermophysics **13**, 435 (1992).
25. M.A. Anisimov, S.B. Kiselev, J.V. Sengers, and S. Tang, *Crossover approach to global critical phenomena in fluids*, Physica A **188**, 487 (1992).
26. M.A. Anisimov and S.B. Kiselev, *Transport properties of critical dilute solutions*, International Journal of Thermophysics **13**, 873 (1992).
27. M.A. Anisimov, E.E. Gorodestsky, A.J. Davydov, and A.S. Kurliandsky, *Interfacial tension of critical liquid mixtures in the presence of a surfactant*, International Journal of Thermophysics **13**, 921 (1992).
28. S.B. Kiselev and J.V. Sengers, *An improved parametric crossover model for the thermodynamic properties of fluids in the critical region*, International Journal of Thermophysics **14**, 1 (1993).
29. M.Y. Belyakov and S.B. Kiselev, *Crossover behavior of the susceptibility and the specific heat near a second-order phase transition*, Physica A **190**, 75 (1992).
30. M.A. Anisimov, E.E. Gorodetskii, V.D. Kulikov, and J.V. Sengers, *Joint description of vapor-liquid and consolute critical phenomena*, JETP Letters **60**, 535 (1994).
31. M.A. Anisimov, E.E. Gorodetskii, V.D. Kulikov, and J.V. Sengers, *Crossover between vapor-liquid and consolute critical phenomena*, Physical Review E **51**, 1199 (1995).
32. M.A. Anisimov, E.E. Gorodetskii, V.D. Kulikov, A.A. Povodyrev, and J.V. Sengers, *A general isomorphism approach to thermodynamic and transport properties of binary fluid mixtures*, Physica A **220**, 277 (1995); Physica A **223**, 272 (1996).
33. M.A. Anisimov, V.A. Agayan, A.A. Povodyrev, J.V. Sengers, and E.E. Gorodetskii, *Two-exponential decay of dynamic light scattering in near-critical fluid mixtures*, Physical Review E **57**, 1946 (1998).
34. I.K. Yudin, G.L. Nikolaenko, E.E. Gorodetskii, E.L. Markhashof, V.A. Agayan, M.A. Anisimov, and J.V. Sengers, *Crossover kinetics of asphaltene aggregation in hydrocarbon solutions*, Physica A **251**, 235 (1998).
35. J.S. Hager, M.A. Anisimov, J.V. Sengers, and E.E. Gorodeskii, *Scaling of demixing curves and crossover from critical to tricritical behavior in polymer solutions*, Journal of Chemical Physics **117**, 5940 (2002).
36. I.K. Yudin, G.L. Nikolaenko, V.I. Kosov, V.A. Agayan, M.A. Anisimov, and J.V. Sengers, *A compact photon-correlation spectrometer for research and education*, International Journal of Thermophysics **18**, 1237 (1997).

37. J. Jacobs, M.A. Anisimov, J.V. Sengers, V. Dechabo, I.K. Yudin, and R.W. Gammon, *Light scattering and crossover critical phenomena in polymer solutions*, Applied Optics **40**, 4160 (2001).
38. M.A. Anisimov, A.F. Kostko, J.V. Sengers, and I.K. Yudin, *Competition of mesoscales and crossover to tri-criticality in near critical polymer solutions*, Journal of Chemical Physics **123**, 164901 (2005).
39. D. Subramanian, D.A. Ivanov, I.K. Yudin, M.A. Anisimov, and J.V. Sengers, *Mesoscale inhomogeneities in aqueous solutions of 3-methylpyridine and tertiary butyl alcohol*, Journal of Chemical Engineering Data **56**, 1238 (2011).
40. M.A. Anisimov and J.V. Sengers, *In memoriam: Evgenii E. Gorodetskii (1941-2015) and Sergei B. Kiselev (1951-2015),* International Journal of Thermophysics **37**: 40 (2016).
41. M.A. Anisimov and J.V. Sengers, *On the choice of a hidden variable near the critical point of fluid mixtures*, Physics Letters A **172**, 114 (1992).
42. A. Kostrowicka Wyczalkowska, Kh.S. Abdulkadirova, M.A. Anisimov, and J.V. Sengers, *Thermodynamic properties of H_2O and D_2O in the critical region*, Journal of Chemical Physics **113**, 4985 (2000).
43. Kh.S. Abdulkadirova, A. Kostrowicka Wyczalkowska, M.A. Anisimov, and J.V. Sengers, *Thermodynamic properties of mixtures of H_2O and D_2O in the critical region*, Journal of Chemical Physics **116**, 4597 (2002).
44. Kh.S. Abdulkadirova, C.J. Peters, J.V. Sengers, and M.A. Anisimov, *An isomorphic Peng-Robinson equation for phase-equilibria properties of hydrocarbon mixtures in the critical region*, Journal of Supercritical Fluids **55**, 594 (2010).
45. M.A. Anisimov, E. Luijten, V.A. Agayan, J.V. Sengers, and K. Binder, *Shape of crossover between mean-field and asymptotic critical behavior in a three-dimensional Ising lattice*, Physics Letters A **264**, 63 (1999).
46. M.A. Anisimov, J. Jacob, A. Kumar, V.A. Agayan, and J.V. Sengers, *Experimental evidence for crossover to mean-field tricritical behavior in a concentrated salt solution,* Physical Review Letters **85**, 2336 (2000).
47. J. Jacob, M.A. Anisimov, A. Kumar, V.A. Agayan, and J.V. Sengers, *Novel phase-transition behavior in an aqueous electrolyte solution*, International Journal of Thermophysics **21**, 1321 (2000).
48. V.A. Agayan, M.A. Anisimov, and J.V. Sengers, *A crossover parametric equation of state for Ising-like systems*, Physical Review E **64**, 026125 (2001).
49. M.A. Anisimov, A.A. Povodyrev, V.D. Kulikov, and J.V. Sengers, *Nature of crossover between Ising-like and mean-field critical behavior in fluids and fluid mixtures*, Physical Review Letters **75**, 3146 (1995); **76**, 4095 (1996).
50. A.A. Povodyrev, G.X. Jin, S.B. Kiselev, and J.V. Sengers, *Crossover equation of state for the thermodynamic properties of mixtures of methane and ethane in the critical region*, International Journal of Thermophysics **17**, 909 (1996).
51. A.A. Povodyrev, M.A. Anisimov, J.V. Sengers, and J.M.H. Levelt Sengers, *Vapor-liquid equilibria, scaling,* and *crossover in aqueous solutions of sodium chloride near the critical line*, Physica A **244**, 298 (1997).
52. Y.B. Melnichenko, M.A. Anisimov, A.A. Povodyrev, G.D. Wignall, J.V. Sengers, and W.A. Van Hook, *Sharp crossover of the susceptibility in polymer solutions near the critical demixing point*, Physical Review Letters **79**, 5266 (1997).
53. J. Jacob, A. Kumar, M.A. Anisimov, A.A. Povodyrev, and J.V. Sengers, *Crossover from Ising to mean-field critical behavior in an aqueous electrolyte solution*, Physical Review E **58**, 2188 (1998); **59**, 1283 (1999].

54. M.A. Anisimov, A.A. Povodyrev, and J.V. Sengers, *Crossover critical phenomena in complex fluids*, Fluid Phase Equilibria **158-160**, 537 (1999),
55. A.A. Povodyrev, M.A. Anisimov, and J.V. Sengers*, Crossover Flory model for phase separation in polymer solutions*, Physica A **264**, 345 (1999).
56. A.A. Povodyrev, M.A. Anisimov, J.V. Sengers, W.L. Marshall, and J.M.H. Levelt Sengers, *Critical locus of aqueous solutions of sodium chloride*, International Journal of Thermophysics **20**, 1529 (1999).
57. M.A. Anisimov, A.F. Kostko, and J.V. Sengers, *Competition of mesoscales and crossover to tricriticality in polymer solutions*, Physical Review E **65**, 051805 (2002).
58. A.F. Kostko, M.A. Anisimov, and J.V. Sengers, *Dynamic crossover to tricriticality and anomalous slowdown of critical fluctuations by entanglements in polymer solutions*, Physical Review E **66**, 020803(R) (2002).
59. A.F. Kostko, M.A. Anisimov, and J.V. Sengers, *Probing structural relaxation in complex fluids by critical fluctuations*, JETP Letters **79**, 117 (2004).
60. A.F. Kostko, M.A. Anisimov, and J.V. Sengers, *Criticality in aqueous solutions of 3-methylpyridine and sodium bromide*, Physical Review E **70**, 026118 (2004).
61. A.F. Kostko, M.A. Anisimov, and J.V. Sengers, *Dynamics of critical fluctuations in polymer solutions*, Physical Review E **76**, 021804 (2007).
62. J.V. Sengers and M.A. Anisimov, *Thermophysical properties of fluids obtained from equilibrium and nonequilibrium fluctuations*, Вести газовой науки **(**News on Gas Science) Nr. 4, **49,** 14-28 (2021).
63. M.A. Anisimov, *Letter to the Editor, Fifty years of breakthrough discoveries in fluid criticality*, International Journal of Thermophysics **32**: 2001 (2011).
64. Z.Y. Chen, P.C. Albright, and J.V. Sengers, *Crossover from singular critical to regular classical thermodynamic behavior of fluids*, Physical Review A **41**, 3161 (1990).
65. Z.Y. Chen, A. Abbaci, S. Tang, and J.V. Sengers, *Global thermodynamic behavior of fluids in the critical region*, Physical Review A **42**, 4470 (1990).
66. G.X. Jin, S. Tang, and J.V. Sengers, *Global thermodynamic behavior of fluid mixture in the critical region*, Physical Review E **47**, 388 (1993).
67. Y.C. Kim, M.A. Anisimov, J.V. Sengers, and E. Luijten, *Crossover critical behavior in the three- dimensional Ising model*, Journal of Statistical Physics **110**, 591 (2003).
68. M.A. Anisimov and J.V. Sengers, *Scaling, tricriticality, and crossover in. polymer solutions*, Molecular Physics **103**, 3061 (2005).
69. M.A. Anisimov, T.J. Longo, and J.V. Sengers, *Critical fluctuations in polymer solutions: Crossover from criticality to tricriticality*, in "50 years of the renormalization group/ Dedicated to the memory of Michael E. Fisher, A. Aharony, O. Entin-Wohlman, D.A Huse, and L. Radzihovsli, eds. (World Scientific, Singapore, 2024), Chapter 12, pp. 119-145. doi.org/10.1142/9789811282386_0012.
70. W. Wagner and A. Pruβ, *The IAPWS formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use*, Journal of Physical and Chemical Reference Data **31**, 387 (2002).
71. S. Herrig, M. Thol, A.H. Harvey and E.W. Lemmon, *A reference equation of state for heavy water*, Journal of Physical and Chemical Reference Data **47**, 043102 (2018).

72. V. Holten, J.V. Sengers, and M.A. Anisimov, *Equation of state for supercooled water at pressures up to 400 MPa*, Journal of Physical and Chemical Reference Data **43**, 043101 (2014).
73. J.K. Bhattacharjee, R.A. Ferrell, R.S. Basu, and J.V. Sengers, *Crossover function for the critical viscosity of a classical fluid*, Physical Review A **24**, 1469 (1981).
74. G.A. Olchowy and J.V. Sengers, *Crossover from singular to regular critical behavior of the transport properties of fluids in the critical region*, Physical Review Letters **61**, 15 (1988).
75. G.A. Olchowy and J.V. Sengers, *A simplified representation for the thermal conductivity of fluids in the critical region*, International Journal of Thermophysics **10**, 417 (1989).
76. R.A. Perkins, J.V. Sengers, I.M. Abdulagatov, and M.L. Huber, *Simplified model for the critical thermal-conductivity enhancement in molecular fluids*, International Journal of Thermophysics **34**, 191 (2013).
77. M.L. Huber, R.A. Perkins, A. Laesecke, D.G. Friend, J.V. Sengers, M.J. Assael, I.N. Metaxa, E. Vogel, R. Mareš, and K. Miyagawa, *New international formulation for the viscosity of H_2O*, Journal of Physical and Chemical Reference Data **38**, 101 (2009).
78. M.L. Huber, R.A. Perkins, D.G. Friend, J.V. Sengers, M.J. Assael, I.N. Metaxa, K.Miyagawa, R. Hellman, and E. Vogel, *New international formulation for the thermal conductivity of H_2O,* Journal of Physical and Chemical Reference Data **41**, 033102 (2012).
79. I.M. Abdulagatov, I. Sh. Khabriev, V.F. Khairutdinov, and S.M. Rasulov, *Influence of critical fluctuations on the thermodynamic and transport properties of supercritical fluids: Nonclassical crossover equations of state: A review*, Russian Journal of Physical Chemistry B **18**, 1655 (2024).
80. J.V. Sengers, *Growing up in The Netherlands* (Amazon.com., 2021), 100pp.
81. M.A. Anisimov, P.G. Debenedetti, S.C. Greer, and M.E. Moldover, *Anneke Levelt Sengers: An international authority in the thermodynamics of fluids and a passionate advocate for women in science*, PNAS **121**, e241585121 (2024); https://doi.org/10.1073/pnas.241585121.
82. P. Skripov, S. Rutin, and L. Chen, *Short-term supercritical heat transfer: In memory of Anneke Levelt Sengers*, The Journal of Supercritical Fluids **218**, 106516 (2025); https://doi.org/10.1016/j.supflu.2025.106516.

UDC 536.423

S.S. Sazhin, A.V. Barsukov, V.V. Terekhov

Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk 630090, Russian Federation

NEW APPROACHES TO MODELLING HEATING AND EVAPORATION OF LIQUID FILMS

A model of the heating and evaporation of a multi-component liquid film, based on the analytical solutions to the heat transfer and component diffusion equations inside this film, was suggested in [1]. For the heat transfer equation, the Dirichlet boundary condition was used at the solid surface and the Robin boundary condition was used at the film outer surface. For the component diffusion equations, the Neumann boundary conditions were used at the solid surface, and Robin boundary conditions were used at the film outer surface [2]. This model was generalised by Barsukov et al. [3] to consider the contribution of the heat flux to/from the solid surface, using the Neumann boundary condition for the heat transfer equation, and removal/supply of liquid from/to the film. As in [1], the Robin boundary condition at the film outer surface was used. The analytical solutions to these equations were used at each time step of the calculation. A summary of previously published and unpublished results for the development of the model of multi-component liquid film heating and evaporation will be presented. This will include a new non-trivial development of the weakly non-linear model in which the dependence of liquid density, specific heat capacity, and thermal conductivity on temperature and position in the film are considered.

References

1. Sazhin, S.S., Rybdylova, O., Crua, C. A mathematical model for heating and evaporation of a multi-component liquid film. Int. J. Heat and Mass Transfer 2018. V.117, P. 252–260.
2. Sazhin, S.S. Droplets and Sprays: Simple Models of Complex Processes. Springer (Series 'Mathematical Engineering'). 2022 https://doi.org/10.1007/978-3-030-99746-5\
3. Barsukov, A.V., Antonov, D.V., Nazarov, A.D., Miskiv, N.B., Nazarov, N.A., Terekhov, V.V., Shchepakina, E.A., Sobolev, V.A., Sazhin, S.S. Heating and evaporation of a multi-component liquid film: effects of heat flux at the wall and continuous supply of liquid. Physics of Fluids 2025. 37(12) 122108.

The study was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Grant 075-15-2025-007).

P.V. Skripov

Institute of Thermal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 620016, Yekaterinburg, Amundsen st., 107a

THERMOPHYSICAL SEMINAR DEDICATED TO THE 95TH ANNIVERSARY OF JAN SENGERS: OPENING REMARKS

In determining thermal conductivity as the typical transfer coefficient, higher standards are demanded of the choice of the experimental conditions and their maintenance during long-term measurements. This is dictated by the procedure of measuring the thermal conductivity of a substance. In this context, the reliability of the results is determined not only by the accuracy of measuring the variables (stationary methods used in the critical region measure the lengths of segments and the voltage drops, which are used to determine the temperature difference), but also by the degree of approximation of the experimental conditions to the requirements of the model within which the primary data are converted to the thermal conductivity values. The key requirement in this context is to ensure the immobility of the medium in the measuring volume. Meeting this requirement in the vicinity of the critical point is a challenge, which was noted by most of the researchers. The search for a way to suppress convection has been reduced to a tendency of decreasing the characteristic size of the measuring cell and the temperature difference. The highest consistency of matching the experimental conditions with the model requirements was ensured, in our opinion, by Antonius Michels and Jan Sengers. Their three articles on the measurement of the thermal conductivity of carbon dioxide in Physica_A, 1962, became classical. They set a certain quality standard in the procedure for setting up experiments with near-critical fluids, accompanied by the presentation of primary data.

As a whole, the extreme type of thermophysical properties behavior directly in the near-critical region became known from stationary measurements and listed in the Standard Tables. There is no doubt that they are observed in laboratory conditions. But, in my opinion, they created a certain template, being face to face with which it is possible not to notice some important things. So, the main question that remains open to me is: Do the Tables mentioned here provide the key to the door from a laboratory test tube to “the world” of real heat transfer processes? Do they really work or, like a rainbow, we see it but cannot touch? The interested reader can find the results of our search for an answer to this question elsewhere [1–3].

Figure 1 – My report at the Measurement in Slovakia. It took place on May 27, 2019, Jan Sengers' 88th birthday

Список литературы

1. Skripov P.V., Rutin S.B. Features of supercritical heat transfer at short times and small sizes // International Journal of Thermophysics. 2021. V. 42, N. 7 art# 110.
2. Abdulagatov I.M., Skripov P.V. Thermodynamic and transport properties of supercritical fluids. Part 2: Review of transport properties // Russ. J. Phys. Chem. B. 2021. V. 15. P. 1171–1188.
3. Melkikh A.V., Rutin S.B., Skripov P.V. Heat transfer in a supercritical-pressure liquid under pulse heating: model for a wide range of pressures and temperatures // International Journal of Thermophysics. 2025. V. 46. N. 10 art# 159.

Lin Chen [1,2]

[1] Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

[2] University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China.

Crossing Pseudo-Critical: New Experiments and Quantifications

Abstract:

The current study extends the fundamental experimental quantifications on supercritical region fluid dynamics under representative geometries, which considers the unique thermophysical properties of such fluid states (Chen 2021). A supercritical fluid can be special due to its large variations of thermal and transport properties that differ from normal fluid or two-phase fluid states as working media in energy systems and/or chemical reaction environment (Carlès, 2010). The critical point set aside different fluid regions while the density parameter shows continuous variations and large gradient in the near-critical region and the specific heat show narrowed steep region across the near-critical gas-liquid region as well as the supercritical region. To understand such basic case trends and general fluid-machinery problems, the current study proposes the application of pixelated interferometry to field-based quantifications on boundary heat transfer flows of supercritical fluid, so as to give new possibilities in correlation upgrading and mechanism understanding for real designs and applications.

Interferometers with phase shifting method are appropriate for sensing displacement, vibration, and physical phenomena (Zhang et al., 2022). It provides interferometric pictures of multi-phase retardation angles using a single device, allowing for the reduction of ambient noise and the measurement of non-static behaviors (Chen 2021). This technique of acquiring multi-phase delay angle images with a single device is called Parallel Phase-shifting Interferometry (PPSI).

This study shows the series of works performed in the Heat and Mass Transfer Research Center of Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, on the critical dynamics of CO_2 fluid, for the application targets of wide power conversion, carbon capture and sequestration, chemical and environmental sectors. Newly developed system with pixelated array-masked interferometer system has been successfully applied in the quantitative characterization of critical region fluid dynamics, including the cross-critical, pseudo-critical, convection, local heating response, as well as turbulent boundary flow, etc. This study (1) gives for the first time detailed full field information of critical region phenomena and (2) opens the world of interesting critical region for engineering correlations and (3) allows for future in-depth analysis of local-scaling in real application designs.

Thanks to the support from the CAS Project for Young Scientists in Basic Research (YSBR-043), National Natural Science Foun dation of China (52076207), CNNC Key Laboratory on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics Technology (2020RETHOF-071801).

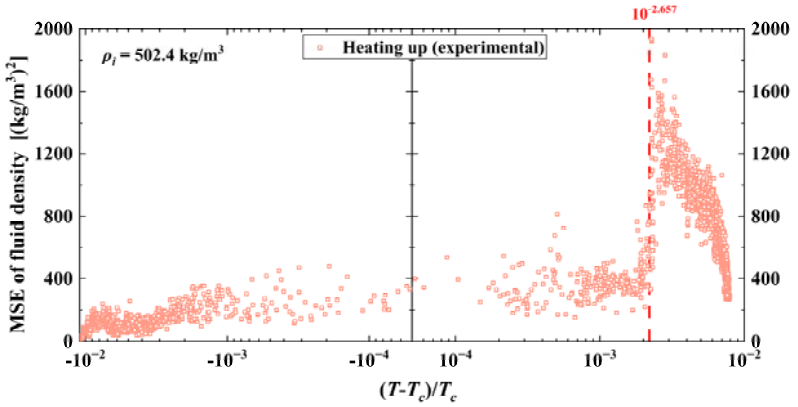

Figure 1 – Experiments shows how the critical fluctuation be dependent on critical distance parameter

References

1. Chen L. Handbook of research on advancements in supercritical fluids applications for sustainable energy systems // IGI Global, Hershey, Pennsylvania. 2021.
2. Beysens D., Chen L. Thermal, mass and momentum transport phenomena as a necessary step to process wastes during long duration space missions by supercritical water oxidation // J. of Supercrit. Fluids. 2025. V. 224. 106658.
3. Skripov P., Rutin S., Chen L. Short-term supercritical heat transfer: in memory of Anneke Levelt Sengers // J. of Supercrit. Fluids. 2025. V. 218. 106516.
4. Liu H., Skripov P., Chen L. Preliminary study on the dynamic equilibrium process of supercritical region CO_2 fluid by phase field method // Int. J. Heat Fluid Flow. 2025. V. 118. 110189.
5. Yang D., Chen L. Visualization of dynamic phase mixing and equilibrium process in transcritical and supercritical conditions // Flow Meas. Instrum. 2023. V. 92. 102399.

УДК 536.423

D.V. Volosnikov

Institute of Thermal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
620016, Yekaterinburg, Amundsen st. 107a

HEAT TRANSFER IN THE COURSE OF WATER SUPERHEATED STATES DECAY

The transition to small-sized devices with pulsed heat generation requires an understanding of the behavior of the heat carrier and the characteristics of heat exchange between the heater and the liquid over a wide range of temperatures. Water, as the primary heat carrier, is used in various heat exchange processes, including water treatment, distillation, decontamination, and removal of harmful impurities, organic compounds, and contaminants, including petroleum products. These processes involve the liquid-to-vapor phase transition and the subsequent brief superheating of water above its equilibrium boiling point, T_s. Sudden changes in the thermal load during pulsed heat generation are often accompanied by significant heat flows and occur in the poorly studied region of superheated states [1, 2]. Understanding the patterns of temperature changes during pulsed heat generation is important for the development of pulsed heat generation technologies, including those used in miniature heat transfer devices [3].

The purpose of the study is to determine the values of water boiling-up temperatures on the surface of a micro-sized heater during pulse heating lasting up to 1 s and the values of heat transfer coefficients into water. The objectives of the study are to use the controlled pulse heating method to capture the liquid-to-vapor phase transition process on a full-scale micro-heater with a heat transfer area of approximately one square millimeter, and to experimentally evaluate the boiling-up temperature range of water during isothermal exposure lasting 10^{-3} – 10^{0} s at atmospheric pressure.

In this study, an isothermal exposure technique was used to determine the instantaneous heat transfer coefficient from a heater to a liquid at different temperature differences [4]. This technique was synchronized with high-speed imaging of the heat transfer processes in a full-scale micro-heater immersed in water. The unique feature of this technique is that it measures the instantaneous heat transfer coefficient not only in the stable states of the substance (where there is no limitation on the system's lifetime) but also in the transiently superheated states. The installation and methodology allow obtaining arrays of experimental data, determining the boiling moment by the experimental values of the evolution of the heat flux density and the probe temperature in the superheated water and aqueous solutions. The measurements discussed are carried out in a wide temperature variation area, including the

spontaneous boiling area of both the initial water and weak hydrogen peroxide solutions under the given experimental conditions [5].

The report presents data on the heat flow from a 20 μm-diameter micro-heater (with a heat transfer area of < 1 mm^2) into water during 1 s of heater thermostabilization. It has been found that in the range of thermostabilization temperatures from 75 to 185°C, there are characteristic temperature intervals for four modes of heat transfer from the micro-heater to the water: conductive mode (CM), convective-conductive mode (CCM) at 100-150°C, spontaneous boiling-up mode (SBM) at 150-170°C, and super-intensive heat transfer mode (SIHTM) at 170-185°C. It has been determined that different intervals of change in heat fluxes correspond to the selected modes of heat transfer to water: from 0.2 to 0.5 kW/cm^2 for the CM and CCM modes; up to 1 kW/cm^2 for the SBM mode, and 2.4 kW/cm^2 for the SIHTM mode. In addition, experiments with gas-saturated water were conducted using weak solutions of hydrogen peroxide. It has been shown that at atmospheric pressure, the gas intensifies heat exchange and reduces the overheating of the main component by 30-40 °C relative to the initial component (water).

References

1. Skripov, P.V., Thermophysical properties of liquids in not fully stable states—From the first steps to the current trends, *Energies*, 2022, V. 15, N. 12, p. 4440. https://doi.org/10.3390/en15124440
2. Zhukov S.A., Afanas'ev S.Yu., Echmaev S.B. Concerning the magnitude of the maximum heat flux and the mechanisms of superintensive bubble boiling // *Int. J. of Heat and Mass Transf.* 2003. V. 46. N 18. P. 3411.
3. Van Erp R., Soleimanzadeh R., Nela L., etc. Co-designing electronics with microfluidics for more sustainable cooling // *Nature*. 2020. V. 585. N. 7824. p. 211. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2666-1
4. Volosnikov D.V., Povolotsky I.I., Starostin A.A., P. V. Skripov. Heat Transfer to Aqueous Glycol Solutions in Pulse-Superheated States // *High Temperature.* 2021. V. 59, N. 2–6, p. 283. DOI: 10.1134/S0018151X21020152
5. Gubin A.A., Marchukova A.A., Povolotskiy I.I., Volosnikov D.V., Python processing of data from a pulsed thermophysical experiment, Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys., 2024, vol. 88, no. 9, pp. 1388. https://doi.org/10.1134/s1062873824707591

The investigation has been conducted at the expense of a grant of the Russian Science Foundation (project № 23-69-10006), https://rscf.ru/project/23-69-10006/ .

Д.В. Антонов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Томск, пр. Ленина, 30

ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ГЕТЕРОГЕННЫХ КАПЛЯХ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ

Многокомпонентные и многофазные потоки различного состава и дисперсности с достижением критических условий их фрагментации являются типичными технологическими средами во многих практических приложениях. В частности, в контактных теплообменных аппаратах [1], распылительных сушильных установках [2], аппаратах термической очистки жидкостей [3], камерах сгорания жидких топлив [4] и медицине [5]. Данные процессы считаются сложно управляемыми, что затрудняет их внедрение на реальных промышленных объектах и технологических узлах. Эффективность таких технологий зависит от скорости испарения жидкости. Наибольшая эффективность прогрева и испарения жидкостей соответствует минимальным размерам капель и наибольшим тепловым потокам. Однако чаще всего сформированные при первичном распылении мелкодисперсные потоки жидкости вследствие проявляющихся эффектов торможения и разворота увлекаются газовым потоком и уносятся из зоны интенсивного тепломассообмена [3]. Это снижает эффективность технологического процесса в целом.

Одним из путей решения проблемы повышения эффективности испарения жидкостей в капельном состоянии может являться вторичное измельчение капель непосредственно в зоне теплообмена [4]. Дробление капель происходит без использования дополнительных технических средств и позволяет организовать технологический процесс таким образом, чтобы обеспечить минимальные размеры капель в заданной зоне нагрева и избежать негативных последствий разворота и уноса капель до достижения ими рабочей области (рис. 1). Наиболее интересными примерами фрагментации многокомпонентных и многофазных капель являются процессы «паффинга» и «микровзрывного» распада [2]. Схема измельчения спрея многокомпонентной и многофазной жидкости представлена на рис. 1.

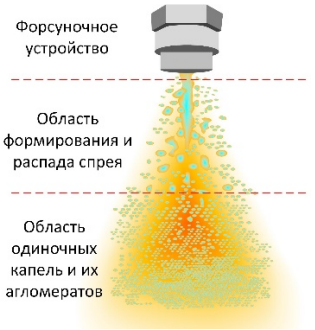

Рисунок 1 – Схема первичного и вторичного измельчения спрея многокомпонентной и многофазной жидкости

Список литературы

1. Kunkel S., Teumer T., Dörnhofer P., Schlachter K., Weldeslasie Y., Kühr M., Rädle M., Repke J.-U. Determination of heat transfer coefficients in direct contact latent heat storage systems // Appl. Therm. Eng. 2018. V. 145. P. 71–79.
2. O'Sullivan J.J., Norwood E.-A., O'Mahony J.A., Kelly A.L. Atomisation technologies used in spray drying in the dairy industry: A review // J. Food Eng. 2019. V. 243. P. 57–69.
3. Romero R.J., Rodríguez-Martínez A. Optimal water purification using low grade waste heat in an absorption heat transformer // Desalination. 2008. V. 220. P. 506–513.
4. Stefanitsis D., Malgarinos I., Strotos G., et. al. Numerical investigation of the aerodynamic breakup of Diesel and heavy fuel oil droplets // Int. J. Heat Fluid Flow. 2017. V. 68. P. 203–215.
5. Xin D., Zeng J., Xue K. Surrogate drag model of non-spherical fragments based on artificial neural networks // Powder Technol. 2022. V. 404. P. 117412.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10031), https://rscf.ru/project/24-79-10031/

D.V. Antonov

National Research Tomsk Polytechnic University,
Russia 634050 Tomsk, Lenina avenue, 30

HEAT AND MASS TRANSFER IN HETEROGENEOUS LIQUID DROPLETS DURING INTENSE PHASE TRANSFORMATIONS

The study was funded by a grant from the Russian Science Foundation № 24-79-10031), https://rscf.ru/project/24-79-10031/

УДК 536.423.18

Э.А. Базаев, А.Р. Базаев, Т.А.-Г. Джаппаров, Б.К. Османова, И.М. Абдулагатов[1]

[1] Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал ФГБУН ОИВТ РАН, 367030, Махачкала, пр. И. Шамиля, 39-А

PVTX ИЗМЕРЕНИЯ И КРИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИСТЕМЫ 1-ПРОПАНОЛ+Н-ОКТАН

Термодинамические свойства чистых жидкостей и жидких смесей имеют важнейшее значение для инженерных расчётов, связанных с проектированием, моделированием и оптимизацией промышленных процессов, особенно тех, которые включают технологии сверхкритических флюидов (СКФ). Достоверные знания PVTx - зависимости и производных термодинамических свойств является ключевым фактором для понимания протекания химических реакций и разработки эффективных систем разделения, реакции и экстракции. Таким образом полные данные о термодинамических и транспортных характеристиках жидкости и сверхкритических смесей, представляют значительную практическую ценность для множества индустриальных приложений. Экспериментальные измерения, дополненные надежными методами термодинамического моделирования, остаются основой химической инженерии [1,2].

Бинарные смеси алифатических спиртов и нормальных алканов, такие как 1-пропанол+н-октан, привлекают особое внимание в химической и энергетической промышленности. Добавление нормального алкана к спирту нарушает водородосвязанную сетку, характерную для чистого спирта, вызывая заметные изменения в физических и термодинамических свойствах. Например, смешивание с алканом частично разрушает структурированные агрегаты, образованные посредством водородных связей в чистом спирте, изменяя межмолекулярные взаимодействия. Термодинамические характеристики, такие как критические параметры, избыточные молярные объемы, вириальные коэффициенты и параметры Кричевского, предоставляют ценную информацию о таких структурных изменениях и отражают лежащие в их основе микроскопические особенности смеси.

В настоящей работе приведены новые высокоточные экспериментальные данные для смесей 1-пропанола и н-октана трех составов 0.2, 0.5 и 0.8 (x - мольные доли н-октана), в диапазоне температур от 363.15 до 623.15 К и давлений вплоть до 59.34 МПа включая области докритического состояния (однородные жидкая и газовая фазы, двухфазная жидкость+газ), околокритическое и сверхкритическое состояние.

По результатам измерений нами определены границы перехода фаз жидкость-газ (ps, Ts, ρs) (рис1,2), а также критические кривые в координатах pc-x, Tc-x и ρc-x. Данная работа является продолжением наших исследований смесей 1-пропанола с н-пентаном, н-гексаном и н-гептаном [3-5].

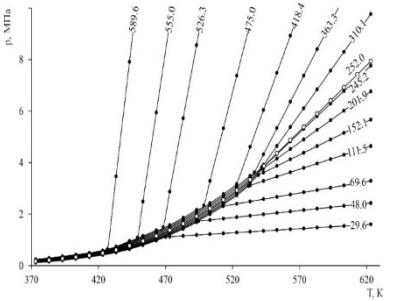

Рисунок 1 – Изохоры 29.6 – 589.6 кг/м^3 зависимости давления от температуры системы 1-пропанол+н-октан состава x = 0.5 мольных долей компонентов

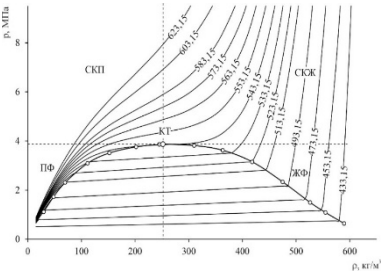

Рисунок 2 – Изотермы зависимости давления от плотности системы 1-пропанол+н-октан состава x=0.5 мольных долей компонентов. ЖФ – жидкая фаза, ПФ – паровая фаза, СКЖ – сверхкритическая жидкость, СКП – сверхкритический пар, КТ – критическая точка

Список литературы

1. Cox K.R. Physical property needs in industry // Fluid Phase Equilib. 1993. V. 82. P. 15−16.
2. Baldea M., Broadbelt L.J., Ierapetritou M.G., et al. 2024 in retrospective: trends in chemical engineering // Ind. Eng. Chem. Res. 2025. V. 64. P 11615−11623.
3. Базаев Э.А., Базаев А.Р. Фазовые превращения и критические свойства системы C3H7OH–C5H12 // ТВТ. 2022. Т. 60. № 1. С. 38−45.
4. Базаев Э.А., Базаев А.Р. Фазовые превращения жидкость–пар и критические свойства системы C3H7OH–C6H14 // ТВТ. 2019. Т. 57. № 3. С. 390−396.
5. Базаев Э.А., Базаев А.Р., Абдулагатов И.М., Джаппаров Т.А.-Г., Османова Б.К. Фазовые превращения и критические свойства системы C3H7OH-C7H17 // ТВТ. 2024. Т. 62. № 1. С. 29−37.

М.Ю. Беляков[1], *Р.Г. Батырова*[2], *Н.В. Ибавов*[2], *А.М. Алиев*[2], *И.М. Абдулагатов*[3,4,*]

[1]Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия
[2]Институт физики ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия
[3]Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки ОИВТ РАН, Махачкала, Россия
[4]Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия
[*]Corresponding author. E-mail: ilmutdina@gmail.com

АСИМПТОТИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ЛИНИИ ВИДОМА ДЛЯ ИЗОХОРНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ФЛЮИДОВ В РАМКАХ МАСШТАБНОЙ ТЕОРИИ ЗАВЕРШЕННОГО СКЕЙЛИНГА. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

Изохорная теплоемкость (C_V) сверхкритических флюидов является фундаментальным термодинамическим свойством для научных и технологических приложений, в частности, для исследований критических аномалий термодинамических и транспортных свойств, индуцированные крупномасштабными флуктуациями параметра порядка (плотности) и «сверхкритических фазовых переходов» из «жидко-подобного» к «газо-подобному» состояниям, которые ассоциированы поведением линий Видома. Изохорная теплоемкость является наиболее чувствительным свойством к микроскопическим изменениям в системе, что делает ее теоретически важной характеристикой сверхкритических флюидов. Теплофизические свойства сверхкритических флюидов аномально резко меняются в области близкой к линии Видома [1], где «жидко-подобная фаза» переходит к «газо-подобной». Вблизи линии Видома наблюдается кроссовер от жидко-подобного» к «газо-подобному» состоянию, что приводит к резким изменениям термодинамических и транспортных свойств сверхкритического флюида в узких интервалах температур. Эти переходы обусловлены сильными критическими флуктуациями (критическим усилением), приводящими к высоким коэффициентам теплоотдачи, которая позволяет существенно уменьшить толщину стенок и габариты реакторов при работе в условиях высокого давления. Данный эффект также наглядно проявляется на диаграммах энтальпия–давление, где изменение энтальпии вдоль изобары между двумя изотермами значительно больше вблизи критической точки вследствие более высоких плотностей энергии.

В работе приводится результаты экспериментальных исследований линий максимумов изохорной теплоемкости (линия Видома) сверхкритических флюидов (CO_2, бензола, 1- пропанол, 2-пропанол, DEE и др.) в T-ρ и P-T плоскостях. Обнаружено, что максимум изохорной теплоемкости вдоль сверхкритических изотерм смещается в сторону малых плотностей и затем резко увеличивается в сторону больших плотностей и вновь достигает критической изохоры. Скейлинговое уравнение для изохорной теплоемкости в асимптотической области в рамках завершенного скейлинга имеет вид:

$$C_\rho \propto A_0 r^{-\alpha}\left(1+\left(A_{11}-A_{12}r^{\gamma-1}\right)r^{\beta}\theta+\left(1-2\beta\right)b^2\theta^2\right), \qquad (1)$$

В случае традиционного скейлинга параметр $A_{11}=0$. Используя условия максимума функции, $(\partial C_V/\partial \rho)_T=0$, получено выражение для асимптотического поведения линии Видома в рамках масштабной теории завершенного скейлинга [2] в виде:

$$\Delta\bar{\rho} = C_1\tau^{2\beta} + C_2\tau^{1-\alpha} + C_3\tau + \cdots \qquad (2)$$

где $\Delta\bar{\rho}=\dfrac{\rho}{\rho_c}-1$, $\tau=\dfrac{T}{T_c}-1\geq 0$. Здесь член $C_1\tau^{2\beta}<0$ появляется в рамках концепции завершенного скейлинга. При традиционном подходе (не завершенного скейлинга) $C_1=0$. Используя экспериментальные данные $\Delta\bar{\rho}$ - τ на линии максимумов изохорной теплоемкости CO_2, бензола, определены значения параметров ур. (1): Бензол (T_C=562.03 К и ρ_C=304.71 кг·м$^{-3}$) C_1=-3.408221, C_2=2.705480, и C_3=18.542782; 2-пропанол (T_C= 508.30 К и ρ_C=273.00) C_1=-3.570110, C_2=9.140768, и C_3=-3.360799. На рис. 1 приведены сравнения экспериментальных значений максимумов C_V вдоль сверхкритических изотерм вместе со значениями, рассчитанными из полученного скейлингового выражения (1).

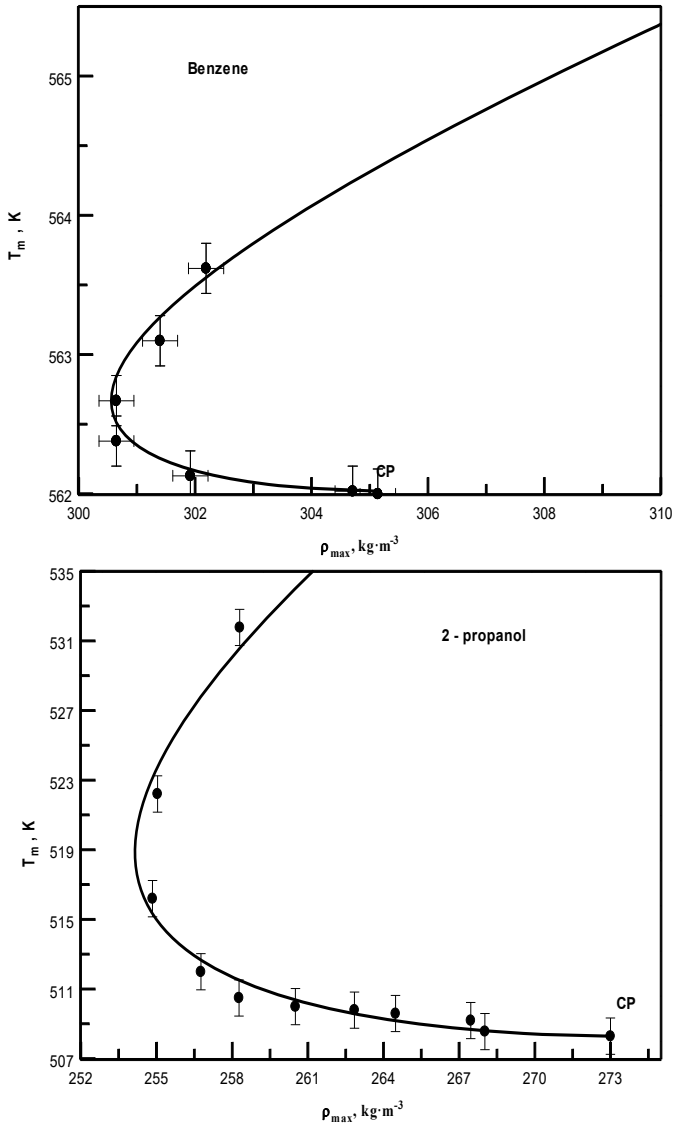

Рисунок 1 – Асимптотическое поведение линий Видома (максимумов C_V вдоль сверхкритических изотерм) для изохорной теплоемкости бензола (сверху) и 2-пропанола (снизу). Символы экспериментальные данные. Сплошная линия расчет по скейлинговому уравнению (1)

Список литературы

1. Polikhronidi N.G., Batyrova R.G., Aliev A.M., Abdulagatov I.M., Supercritical CO_2. Properties and technological applications- Review // J. Thermal Sciences. 2019. V. 28. P. 394–430. (Special Issue). https://doi.org/10.1007/s11630-019-1118-4.
2. Belyakov M.Yu., Batyrova R.G., Ibavov N.V., Abdulagatov I.M., Experimental Validation of the Complete Scaling Fundamental Principles in the Theory of Critical Phenomena // Journal of Molecular Liquids. 2026. P. 129035. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2025.129035

M. Yu. Belyakov[1], R.G. Batyrova [2], N.V. Ibavov [2], A.M. Aliev[2], I.M. Abdulagatov [3,4,]*

[1]Oil & Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
[2]Institute of Physics of the Dagestan Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russian Federation
[3]Thermophysical Properties Division, Geothermal & Renewable Energy Institute, High Temperature Joint Institute of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russian Federation
[4]Dagestan State University, Makhachkala, Russian Federation
[*]Corresponding author. E-mail address: ilmutdina@gmail.com

ASYMPTOTIC BEHAVIOR OF THE WIDOM LINE FOR ISOCHORIC HEAT CAPACITY OF SUPERCRITICAL FLUIDS IN THE FRAMEWORK OF THE COMPLETE SCALING THEORY. EXPERIMENTAL VERIFICATION

УДК 536.7

К.А. Боярских, К.В. Хищенко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,
125412, Москва, Ижорская, 13, стр. 2

УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ ВБЛИЗИ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ЖИДКОСТЬ–ПАР

Решение широкого круга прикладных задач современной физики сопряжено с необходимостью проведения численного моделирования теплофизических процессов при высоких давлениях и температурах. Поэтому важно знать термодинамические свойства в широкой области состояний на фазовой диаграмме материалов, которые используются в решаемых задачах.

Эта работа посвящена теоретическому описанию термодинамики жидких металлов при высокой концентрации энергии. Предложены уравнения состояния для расплавов редкоземельных и тугоплавких металлов. Термодинамическая модель (для построения уравнений состояния) представлена зависимостью удельной свободной энергии от удельного объема и абсолютной температуры. В ней раздельно учтены вклады теплового движения атомов и электронов, а также упругая составляющая, учитывающая поведение вещества на изотерме ноль кельвинов. Эта модель содержит параметры (константы), значения которых индивидуальны для каждого металла. Они определяются из условия наилучшего описания экспериментальных данных по тепловому расширению жидкой фазы и ударному сжатию образцов исследуемого вещества. Проведен расчет характеристик жидкой фазы металлов по построенным уравнениям состояния в условиях, которые соответствуют рассматриваемым опытам. Расчетные характеристики сопоставлены с результатами исследования ударной сжимаемости и с информацией о температурной зависимости плотности металлических расплавов из экспериментов по методу проникающего излучения, левитации, а также из экспериментов по электровзрыву проводников. Достигнуто согласие модельных зависимостей с экспериментальными данными в пределах погрешностей измерения.

Результаты настоящего исследования могут быть использованы для численного моделирования теплофизических процессов в жидких металлах при высоких давлениях и температурах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-19-00944, https://rscf.ru/project/25-19-00944/*).*

K.A. Boyarskikh, K.V. Khishchenko

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
Russia, 125412, Moscow, Izhorskaya, 13 Bldg 2

EQUATIONS OF STATE FOR METALLIC LIQUIDS NEAR THE CRITICAL POINT OF THE LIQUID–VAPOR PHASE TRANSITION

The work is carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project № 25-19-00944, https://rscf.ru/project/25-19-00944/*).*

УДК 536.423.18

А.А. Губин[1,2], *Д.В. Антонов*[3]

[1] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук,
620016, Екатеринбург, Амундсена, 107а
[2] Уральский федеральный университет им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина, 620002, Екатеринбург, Мира, 19
[3] Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Томск, пр. Ленина, 30

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА КАПЕЛЬ МЕТОДОМ ФАЗОВОГО ПОЛЯ

В современной энергетике и химической промышленности процессы вторичного измельчения разнородных жидкостей рассматриваются как ключевые механизмы интенсификации горения [1] и глубокой переработки нефтяного и синтетического сырья [2]. Динамика таких процессов определяется тепломассопереносом и локальной гидродинамикой на межфазных границах жидкостей. Широкое применение при прогнозировании этих процессов нашло численное моделирование с помощью подхода interface-tracking, который включает в себя методы Volume of Fluid и level-set [3; 4].

Несмотря на широкие возможности данного подхода, его применение имеет ряд ограничений. В частности, при использовании модели Continuum Surface Force (CSF) для описания межфазного натяжения необходимо вычисление вектора нормали и кривизны поверхности, что повышает чувствительность результатов к пространственному разрешению и качеству расчётной сетки. Этого недостатка лишен метод фазового поля, поскольку капиллярные силы естественным образом входят в тензор напряжений.

В данной работе разработана модель динамики нагрева капли с целью уточнения механизмов её фрагментации. Численное моделирование выполнено методом фазового поля. Капиллярные силы описаны с помощью силы Кортевега. В качестве уравнения состояния вещества использовалось уравнение Ван-дер-Ваальса. Показано, что на интенсивность испарения и фрагментации капель существенно влияет уровень перегрева жидкости и начальное распределение плотности вещества. При высоком уровне перегрева жидкостей и неоднородном распределении вещества достигаются условия распада капель и последующее интенсивное испарение фронта фрагментации.

Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации процессов горения и достижения рекордной глубины переработки нефти.

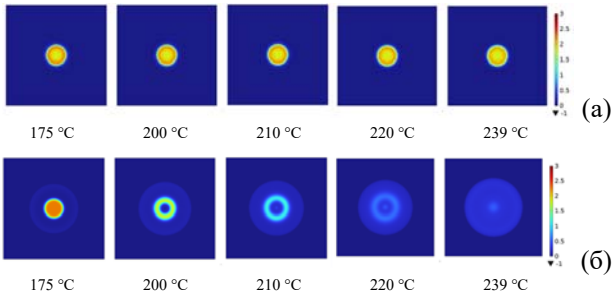

Рисунок 1 – Эволюция распределения плотности в системе.
(а) – начало расчёта; (б) – последний момент времени

Список литературы

1. Nyashina G., Vershinina K.Y., Strizhak P. Impact of micro-explosive atomization of fuel droplets on relative performance indicators of their combustion // Fuel Processing Technology. 2020. V. 201. P. 106334.
2. Daviault S.G., Ramadan O.B., Matida E.A. et al. Atomization performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin fluid atomizer // Fuel. 2012. V. 98. P. 183–193.
3. Fedorenko R.M., Antonov D.V., Lobasov A.S. et. al. Mathematical model to predict child droplets sizes during the micro-explosive breakup of a two-component droplet // Physics of Fluids. 2025. V. 37. No. 7.
4. Antonov D., Vysokomornaya O., Yanovskiy L., Strizhak P. Critical conditions leading to puffing and micro-explosion of composite liquid droplets // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2024. V. 156. P. 107679.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10031), https://rscf.ru/project/24-79-10031/

A.A. Gubin [1,2], *D.V. Antonov* [3]

[1] Institute of Thermal Physics Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
Russia 620016 Yekaterinburg, Amundsena, 107a
[2] Ural Federal University,
Russia, 620002, Yekaterinburg, Mira, 19
[3] National Research Tomsk Polytechnic University,
Russia 634050 Tomsk, Lenina avenue, 30

PHASE-FIELD MODELLING OF DROPLET HEATING DYNAMICS

The study was funded by a grant from the Russian Science Foundation № 24-79-10031), https://rscf.ru/project/24-79-10031/

УДК 541.64

А.В. Мелких[1,2], *П.В. Скрипов*[1]

[1] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук,
620016, Екатеринбург, Амундсена, 107а
[2] Уральский федеральный университет им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина, 620002, Екатеринбург, Мира, 19

МАЛЫЕ ПРИМЕСИ ВОДЫ В УГЛЕВОДОРОДАХ: ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ ЖИДКОСТЬ-ЖИДКОСТЬ И ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООТДАЧИ

В небольших количествах вода содержится практически во всех технических жидкостях, в частности, в углеводородах. Влияние небольших добавок воды в топливо необходимо учитывать как в процессах вскипания веществ, так и при расчете их теплофизических свойств в процессах с импульсным тепловыделением.

В работе построена модель, описывающая известное из опытов увеличение коэффициента теплоотдачи от проволочного зонда к углеводородам, обусловленное малыми примесями воды, при импульсном нагреве зонда. Основным предположением модели является то, что малые кластеры воды играют роль «слабых мест» для возникновения пузырьков основной жидкости (углеводородов). Однако из-за быстрого ухода пузырьков из нагретой области они не успевают вырасти. То есть, кипения фактически не происходит. В рамках модели получены зависимости размеров кластеров воды в подкритической области (когда они являются флуктуациями и не растут) от концентрации воды. Также получены зависимости размеров надкритических кластеров воды (капель) от концентрации воды.

Поскольку из ранее предложенной модели следует, что радиус пузырька пропорционален перегреву

$$R \sim \Delta T \,,$$

то формулу для относительного коэффициента теплоотдачи можно записать в виде:

$$\Delta T = A\left(\alpha - 1\right)^{1/3} .$$

Здесь A – коэффициент пропорциональности, α – добавка к относительному коэффициенту теплоотдачи при импульсном нагреве зонда.

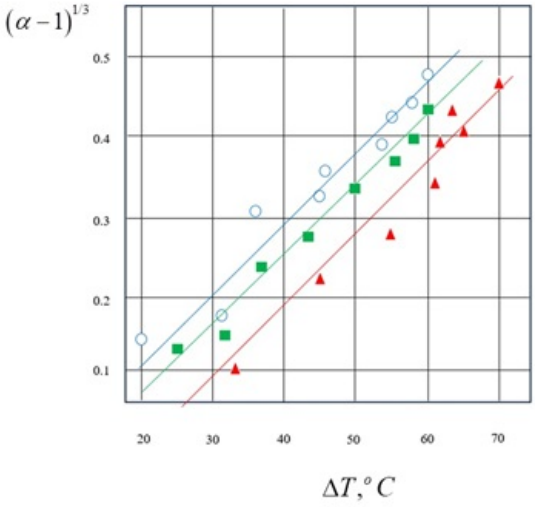

Рисунок 1 – Зависимость величины $(\alpha - 1)^{1/3}$ от перегрева относительно температуры равновесия жидкости с паром

Из рисунка видно, что экспериментальные данные хорошо аппроксимируются прямыми, что является подтверждением правильности теории. Полученные результаты способствуют более глубокому пониманию механизмов теплоотдачи в локально перегретых композитных жидкостях.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-69-10006, https://rscf.ru/project/23-69-10006/

A.V. Melkikh [1,2]*, P.V. Skripov* [1]

[1] Institute of Thermal Physics Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
Russia 620016 Yekaterinburg, Amundsena, 107a
[2] Ural Federal University,
Russia, 620002, Yekaterinburg, Mira, 19

SMALL WATER IMPURITIES IN HYDROCARBONS: LIQUID-LIQUID PHASE TRANSITIONS AND HEAT TRANSFER INTENSIFICATION

The investigation has been conducted at the expense of a grant of the Russian Science Foundation (project № 23-69-10006), https://rscf.ru/project/23-69-10006/

УДК 536.7

Л.Р. Обручкова, К.А. Боярских, Н.Н. Середкин, К.В. Хищенко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,
125412, Москва, Ижорская, 13, стр. 2

НЕКОТОРЫЕ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ СВИНЦА В ВОЛНАХ УДАРНОГО СЖАТИЯ И ИЗОЭНТРОПИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ

Изучение уравнений состояния материалов при высоких давлениях и температурах представляет интерес из-за необходимости замыкания системы уравнений гидродинамики при численном моделировании различных быстропротекающих процессов. Примером таких процессов может служить последовательное прохождение волн ударного сжатия и изоэнтропического расширения по образцу. В отсутствие обмена теплом этот процесс нагружения и разгрузки является адиабатическим, и для его моделирования достаточно использовать простые уравнения состояния, выражающие взаимосвязь удельного объема, внутренней энергии и давления. Но для учета возможных фазовых превращений вещества (к примеру, плавления и испарения) потребуется привлечь более сложные модели, являющиеся термодинамически полными.

В настоящей работе проводится сопоставление результатов расчета по двум уравнениям состояния свинца с экспериментальными данными по ударному сжатию с последующим изоэнтропическим расширением ударно-сжатых образцов различной начальной плотности. Одно из этих уравнений состояния основано на простой зависимости давления от объема и внутренней энергии. Другое уравнение основано на более сложной зависимости свободной энергии от объема и температуры, позволяющей учесть фазовые переходы между кристаллической фазой, жидкостью и паром. Оба уравнения состояния дают хорошее согласие с имеющимися данными из ударно-волновых экспериментов, кроме тех, что относятся к области перехода жидкость–пар, достигаемой при изоэнтропическом расширении ударно-сжатых образцов.

В точке пересечения области фазового перехода жидкость–пар на изоэнтропе наблюдается заметный излом, в частности, на зависимости скорости разлета вещества от давления. Этот эффект может быть учтен в более сложном из двух рассматриваемых уравнении состояния.

Представленные в этой работе уравнения состояния свинца могут быть использованы при практических расчетах волновых процессов сжатия и расширения в этом металле при высоких плотностях энергии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-19-00944, https://rscf.ru/project/25-19-00944/*).*

L.R. Obruchkova, K.A. Boyarskikh, N.N. Seredkin, K.V. Khishchenko

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
Russia, 125412, Moscow, Izhorskaya, 13 Bldg 2

SOME EQUATIONS OF STATE FOR LEAD IN WAVES OF SHOCK COMPRESSION AND ISENTROPIC EXPANSION

The work is carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project № 25-19-00944, https://rscf.ru/project/25-19-00944/*).*

УДК 536.4; 544; 669

Б.А. Русанов[1], *В.Е. Сидоров*[1], *П.С. Попель*[1], *Д.К. Симонов*[1], *В.П. Портнягин*[1], *А.И. Русанова*[2], *А.А. Сабирзянов*[3], *П.А. Чугунов*[4]

[1] Уральский государственный педагогический университет, 620091, Екатеринбург, Космонавтов, 26
[2] Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина УрО РАН, 620016, Екатеринбург, Амундсена, 101
[3] Уральский государственный университет путей сообщения, 620034, Екатеринбург, Колмогорова, 66
[4] Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, 620066, Екатеринбург, Академическая, 20

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ В ТВЁРДОМ И ЖИДКОМ СОСТОЯНИЯХ

Многокомпонентные сплавы в последние годы являются активно исследуемыми материалами, благодаря возможности сочетания высоких значений различных эксплуатационных свойств при получении изделий на их основе. В металлургии получают широкое распространение два класса: сплавы, склонные к аморфизации, а также составы, образующие структуру твёрдого раствора. К первым относятся сплавы на основе железа, никеля, кобальта, с добавками бора и кремния, ко вторым – высокоэнтропийные составы, содержащие алюминий и переходные металлы. Несмотря на востребованность таких сплавов в промышленности, данные об их физических свойствах получены фрагментарно, однако эта информация может влиять на качество конечной продукции. В настоящей работе исследованы физические свойства многокомпонентных сплавов систем FeNiBSiNb, CoFeSiBNb, AlNiCoFeCr, AlNiCoCuZr в широком температурном интервале, включая жидкое состояние.

Сплавы указанных композиций с различным соотношением элементов получены в индукционной печи из чистых металлов при температуре 1800 K в защитной атмосфере гелия. Переплав проводился в тиглях из алунда в течение получаса. Химический состав сплавов исследован атомно-абсорбционным методом. Фазовый состав сплавов изучен методом дифракции рентгеновских лучей и электронной микроскопии.

Плотность сплавов исследована методом проникающего гамма-излучения. Опыты проведены в температурном интервале 293 – 1750 K. Погрешность не превышала 1,5%. Вязкость расплавов измерена на автоматизированной установке, в которой реализован метод затухающих крутильных колебаний. Опыты проведены от ликвидуса до 1750 K. Погрешность не превышала 3%. Электрическое сопротивление сплавов изучено с использованием бесконтактного метода во вращающемся магнитном поле. Эксперименты проводились от 293 K до 1750 K. Погрешность не превышала 3%. Магнитная восприимчивость изучена методом Фарадея.

Опыты проведены от 293 K до 1750 K. Погрешность измерений не превышала 2%. Все эксперименты проводились в тиглях из алунда и защитной атмосфере гелия.

Установлено, что для большинства изученных составов, несмотря на химически-сложный состав, характерны монотонные изменения свойств в широком температурном интервале. Однако, в жидком состоянии температурные зависимости свойств расплавов имеют участки аномальных изменений (изменения температурных коэффициентов, а также несовпадения политерм, полученных при нагреве и последующем охлаждении). Показано, что длительные опыты в указанных условиях не приводят к изменению состава сплавов, а обнаруженные эффекты могут быть связаны с изменениями, происходящими в структуре расплавов при высоких температурах.

Полученные результаты могут использоваться для оптимизации процессов разливки, закалки и подготовки расплавов при получении изделий на основе многокомпонентных систем.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-23-00049), https://rscf.ru/project/25-23-00049/

B.A. Rusanov[1], *V.E. Sidorov*[1], *P.S. Popel*[1], *D.K. Simonov*[1], *V.P. Portnyagin*[1], *A.I. Rusanova*[2], *A.A. Sabirzyanov*[3], *P.A. Chugunov*[4]

[1] Ural State Pedagogical University,
Russia 620091 Yekaterinburg, Cosmonavtov ave., 26
[2] Vatolin Institute of Metallurgy UB RAS,
Russia, 620016, Yekaterinburg, Amundsen st., 101
[3] Ural State University of Railway Transport,
Russia, 620034, Yekaterinburg, Kolmogorov st., 66
[4] Institute of High-Temperature Electrochemistry UB RAS,
Russia, 620066, Yekaterinburg, Akademicheskaya st., 20

PHYSICAL PROPERTIES OF MULTICOMPONENT ALLOYS IN SOLID AND LIQUID STATES

The study was funded by a grant from the Russian Science Foundation № 25-23-00049), https://rscf.ru/project/25-23-00049/.

С.В. Рыков[2], *И.В. Кудрявцева*[3], *Е.Е. Устюжанин*[1], *В.А. Рыков*[3]

[1] Научно-исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Москва, Красноказарменная, 14

[2] Военный институт (инженерно-технический) Военной академии материально-технического обеспечения, 191123 г. Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, 22

[3] Университет ИТМО, 197101, г. Санкт–Петербург, Кронверкский проспект, 49

НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПЛОТНРОСТИ ЖИДКОСТИ И ПЛОТНОСТИ ГАЗА НА ЛИНИИ НАСЫЩЕНИЯ В ОКРЕСТНОСТИ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ CO_2 И SF_6

Введение

Объектами настоящего исследования выбираем, во-первых, плотность жидкости (ρ_l), плотность газа (ρ_g), а также некоторые термодинамические комплексы на линиях насыщения CO_2. Указанные комплексы содержат плотности (ρ_l, ρ_g, ρ_c) в своей структуре; среди этих комплексов рассматриваем: а) относительную плотность жидкости ($\Delta\rho_l = (\rho_l - \rho_c)/\rho_c$)), б) средний диаметр бинодали ($f_d = (\rho_l + \rho_g)/(2\rho_c) - 1$), в) параметр порядка ($f_s = (\rho_l - \rho_g)/(2\rho_c)$), г) отношение $ur = f_d / f_s$, отношение $Z_l = \Delta\rho_l / f_s$, здесь ρ_c – плотность в критической точке (КТ) бинодали. $\Delta T = A(\alpha - 1)^{1/3}$.

Во-вторых, рассматриваем скейлинговые уравнения (СУ); эти уравнения следуют скейлинговой теории критических явлений (СТ) и используются как для описания плотностей (ρ_l, ρ_g), так и построения упомянутых комплексов.

Авторами выполнен анализ ряда работ, где упоминаются: а) расчетные и экспериментальные (ρ_l, ρ_g, T)-данные для CO_2, б) некоторые СУ, а также современные положения СТ; этот анализ приводит к следующим выводам.

1. Для описания бинодали вещества в соответствии с СТ следует привлекать ряд соотношений, которые являются характерными для СУ и работают в асимптотической окрестности КТ; среди них отметим

$$f_s \approx B_{s0}\tau^{\beta}, f_d \approx B_{d0}\tau^{2\beta} + B_{d1}\tau^{1-\alpha},$$

$$\Delta\rho_l \approx B_{s0}\tau^{\beta} + B_{d0}\tau^{2\beta} + B_{d1}\tau^{1-\alpha},\ ur \approx ur_{bas} = (B_{d0}/B_{s0})\tau^{\beta}, \qquad (1)$$

где (B_{d0}, B_{d1}, B_{s0}) – регулируемые коэффициенты; α и β – критические показатели ($\beta = 0.326$ и $\alpha = 0.11$ представляют собой теоретические величины; $\beta \approx 0.35$ и $\alpha \approx 0.12$ представляют собой эмпирические значения; $\tau = (T_c - T)/T_c$ – относительная температура; T_c – температура в КТ.

Наряду с (1) необходимо учитывать ограничения, которые накладывает теория ренормгруппы (ТРГ) на коэффициенты (B_{d0}, B_{d1}), которые имеются в (1); так, в работах [1], [2] показано, что для веществ с некоторой заданной молекулярной структурой, должны выполняться равенства: B_{d0}=0.064, B_{d0}/B_{d1}= -0.21.

2. Опытные (ρ_l, ρ_g, T) данные, например, для CO_2 представлены в ряде работ, в том числе имеются точки, которые получены в [3] и лежат в интервале $4\ 10^{-4}< \tau<0.288$. В нашей работе выделен интервал $2\ 10^{-6}<\tau< 5\ 10^{-3}$, который относится к окрестности КТ и обозначается как область экстраполяции $\Delta\tau_{extr}$. В этой области имеется только несколько значений (ρ_l, ρ_g) при температурах $4\ 10^{-4}<\tau<5\ 10^{-3}$ для CO_2. Расчетные (ρ_l, ρ_g, T) данные, которые имеются в этой области, можно рассматривать как результат экстраполяции литературных опытных (ρ_l, ρ_g, T) данных, лежащих в интервале $4\ 10^{-4}<\tau<0.288$. Указанная экстраполяция выполнена с помощью известных СУ; часть точек, лежащих в области $\Delta\tau_{extr}$, рассчитана на основе уравнений состояния (УС), в том числе УС, представленного в [4] как международное стандартное УС.

Для решения ряда теплофизических задач, а также для проверки некоторых положений СТ требуется численная информация, которая относится к области $\Delta\tau_{extr}$ и представляет собой: а) данные о плотностях (ρ_l, ρ_g) для CO_2 и SF_6, б) значения комплексов (f_d, f_s , *ur,* Z_l и др.).

В настоящей работе ставим следующие цели, связанные с CO_2 и SF_6.

1. Получить численные данные о плотностях (ρ_l, ρ_g), а также значения комплексов (Z_l, Z_g) в области экстраполяции $\Delta\tau_{extr}$; в этих теплофизических (ТФ) расчетах намечено использовать некоторые СУ, в том числе уравнения, представленные в [7].

2. На основе сравнительных ТФ расчетов сделать оценку диапазонов, в которых могут располагаться значения реальных ($\rho_{l\ real}$, $\rho_{g\ real}$, T) данных в области $\Delta\tau_{extr}$, а также исследовать поведение жидкой и газовой ветвей бинодали с помощью комплексов (Z_l, Z_g, ...).

В соответствии с указанными целями авторами рассматриваются задачи *I* и *II* (см. ниже).

1 Выбор СУ

Для решения упомянутых задач привлекаем ряд моделей.

1. Выбираем комплексы (f_s (D, C, τ), f_d(D, C, τ)), которые приведены в [5], [6] и адаптированы к SF_6; запишем эти СУ в форме

$$f_s = B_{s0}\tau^{\beta} + B_{s1}\tau^{\beta+\Delta} + B_{s2}\tau^{\beta+2\Delta} + B_{s3}\tau^{2} + B_{s4}\tau^{3}, \qquad (2)$$

$$f_d = B_{d0}\tau^{2\beta} + B_{d1}\tau^{1-\alpha} + B_{d2}\tau^{1-\alpha+\Delta} + B_{d3}\tau^{2} + B_{d4}\tau^{3}, \qquad (3)$$

где D = (T_c =318.7101 К, ρ_c = 741.649 кг м$^{-3}$, β = 0.3476, α=0.1175, B_{d0}, B_{s0}, Δ=0.5, ...) – критические характеристики, C= (B_{si}, B_{di}, i=1… 4)- регулируемые коэффициенты.

СУ (2), (3) можно применить для теплофизических (ТФ) расчетов, в том числе для определения (ρ_l, ρ_g, T) данные при заданной температуре на основе следующих соотношений

$$\rho_l = \rho_c(1+\Delta\rho_l) = \rho_c(1+ f_s+f_d), \quad (4)$$

$$\rho_g = \rho_c(1+\Delta\rho_g)= \rho_c(1-f_s+f_d). \quad (5)$$

2. Учитывая рекомендации [7], [8], привлекаем функцию $\rho_g(\tau)$, которая адаптирована к SF_6 и которую записываем в виде

$$\rho_g= \rho_c(1-B_{s0}\,\tau^{\beta} -B_{s1}\,\tau^{\beta+\Delta}+ B_{d0}\,\tau^{2\beta} +B_{d1}\,\tau^{1-\alpha} + B_{d2}\tau +...), \quad (6)$$

где (B_{s0}, B_{s1}) –регулируемые коэффициенты, которые вычисляются на основе аппроксимации опытных (ρ_g, T) данных [1] в интервале $4\ 10^{-4}< \tau<0.288$, (B_{d0}, B_{d1}, B_{d2} ...) - коэффициенты, которые определяются по условиям ТРГ, а также вычисляются на основе аппроксимации опытных (ρ_g, T) данных.

Аналогичным образом выбираем функцию $\rho_l(\tau)$ в форме

$$\rho_l= \rho_c(1+B_{s0}\,\tau^{\beta} +B_{s1}\,\tau^{\beta+\Delta}+ B_{d0}\,\tau^{2\beta} +B_{d1}\,\tau^{1-\alpha} + +B_{d2}\tau+\sum_{k=3}^{11} B_{dk}\tau^{\chi}), \quad (7)$$

где (B_{s0}, B_{s1}, B_{d0}, B_{d1}, B_{d2}) - коэффициенты, которые совпадают с аналогичными параметрами (6), (χ_k, k=3 ... 11) - дробные показатели степени, (B_{dk}, k=3 ... 11) - регулируемые коэффициенты.

В моделях (6), (7) используются для SF_6:

а) характеристики D = (ρ_c = 467.6 кг/м^3, T_c = 304.1282, α = 0.11, β = 0.325, B_{s0}=1.5637, B_{d0}=0.1899),

б) отношения $\eta= B_{d0}/B_{d1}$, $\phi=B_{d0}/B_{d2}$ в виде равенств (η = - 0.18, ϕ = 0.12) в соответствии с условиями ТРГ.

2 Некоторые эмпирические модели $\rho_l(\tau)$ и $\rho_g(\tau)$

В работах [9], [10] рассмотрены, во-первых, формы, с помощью которых плотности (ρ_g, ρ_l) можно представить в виде

$$\rho_l= \rho_c(1+Z_l f_s), \qquad \rho_g= \rho_c(1+Z_g f_s), \quad (10)$$

где ($Z_l = \frac{\rho_l-\rho_c}{\rho_c f_s}$, $Z_g = \frac{\rho_c-\rho_g}{\rho_c f_s}$) -комплексы, f_s - некоторая аналитическая функция, например, модель f_s (2).

Во-вторых, укажем на аналогичную форму, которая представлена в [9], адаптирована к SF_6 и которую запишем в виде

$$\Delta\rho_l=f_s\, Z_{l\,eff}\,, \quad |\Delta\rho_g| = f_s\ Z_{g\,eff}\,, \quad (11)$$

$$Z_{l\,eff} = 1 + ur_{eff} + x_2\, ur_{eff}^3, \quad (12)$$

$$Z_{g\,eff} = 1 - ur_{eff} - x_2\, ur_{eff}^3, \quad (13)$$

где $ur_{eff} = x_1\tau^{\beta}$ – аргумент, (x_1= 0.1151, x_2= 314.1)– регулируемые коэффициенты, f_s -параметр порядка (2).

3 Данные о плотностях (ρ_l, ρ_g) для CO_2 и значения комплексов (Z_l, Z_g, ...)

Задача *I* состоит в том, чтобы вычислить (ρ_l, ρ_g, T) данные для CO_2 в интервале $2\cdot10^{-6} < \tau < 0.01$, который включает область $\Delta\tau_{extr}$. В этой задаче рассматриваем ряд уравнений, упомянутых выше.

На этапе 1 задачи *I* используем модели (6), (7) и определяем (ρ_l, ρ_g, T) данные в интервале $6\cdot10^{-6}< \tau<0.28$ с заданным шагом по температуре.

На **этапе 2** обращаемся к СУ (2), (3) и вычисляем, во-первых, параметры , входящие в (2), (3), на основе нелинейного метода наименьших квадратов ($NRMS_1$). В данном методе используются опытные (ρ_l, ρ_g, T) данные [1], которые лежат в интервале $0.2\cdot10^{-7}<\tau<0.3$ и именуются как контрольный массив (КМ). Во-вторых, определяем (ρ_l, ρ_g, T) данные с помощью (2), (3) в интервале $6\cdot10^{-6}< \tau<0.28$.

На **этапе 3** обращаемся к моделям (13) и вычисляем, во-первых, коэффициенты (x_1, x_2) с использованием опытных (ρ_g, ρ_l, T) данных для CO_2 и нелинейного метода наименьших квадратов ($NRMS_2$). В данном методе используются опытные (ρ_l, ρ_g, T) данные, включенные в КМ. Во-вторых, определяем (ρ_l, ρ_g, T) данные с помощью моделей (13) в интервале $6\cdot10^{-6}< \tau<0.28$.

На **этапе 4** выполняем сравнительные ТФ расчеты, в том числе определяем следующие относительные отклонения:

а) $\delta\rho_{l(5)}= 100\ (\rho_{l(5)}-\rho_{l(13)})/\rho_{l(13)}$, % , здесь $\rho_{l(13)}$ - плотность, вычисленная с помощью модели (13), $\rho_{l(5)}$ -плотность, относящаяся к моделям (2), (3), (5);

б) $\delta\rho_{g(4)}=100\ (\rho_{g(4)} - \delta\rho_{g(13)})/\delta\rho_{g(13)}$, %, $\rho_{g(4)}$ -плотность, относящаяся к (2), (3), (4);

в) $\delta\rho_{l(7)}= 100\ (\rho_{l(7)}-\rho_{l(13)})/\rho_{l(13)}$, %, здесь $\rho_{l(7)}$ - плотность, вычисленная с помощью модели (7),

г) $\delta\rho_{g(6)}=100\ (\rho_{g(6)} - \delta\rho_{g(13)})/\delta\rho_{g(13)}$, %, здесь $\rho_{l(6)}$ - плотность, относящаяся к модели (6);

д) $\delta\rho_{l\,exp}= 100\ (\rho_{l\,exp}-\rho_{l(13)})/\rho_{l(13)}$, % , здесь $\rho_{l\,exp}$ - плотность, входящая в КМ;

е) $\delta\rho_{g\ exp}=100\ (\rho_{g\,exp} - \delta\rho_{g(13)})/\delta\rho_{g(13)}$, %; здесь $\rho_{g\ exp}$ - плотность, входящая в КМ.

В рамках **задачи *II***, во-первых, отметим: в соответствии с целью нашей работы представляет интерес исследование характеристик бинодали CO_2, которые связаны с комплексами (Z_l, Z_g, ...). Во-вторых, вычисляем значения (Z_l, Z_g) с использованием некоторых СУ и моделей (13). В этих ТФ расчетах получены значения комплексов (Z_l, Z_g, ...) в интервале $3\cdot10^{-6}< \tau<0.288$.

4 Данные о плотностях (ρ_l, ρ_g) для SF_6 и значения комплексов (Z_l, Z_g, ...)

Задачи и ТФ расчеты, которые являются аналогичными таковым,

рассмотренным в разделе 3, были реализованы применительно к SF_6.

Заключение

Полученные данные о плотности представляем в виде множества точек на графике в координатах (ρ_l, ρ_g, τ); эти точки расположенные случайным образом в окрестностях газовой ветви $\rho_g(\tau)$ и жидкостной ветви $\rho_l(\tau)$ (13) в интервале $4\cdot10^{-4}<\tau<0.01$. При указанных температурах отклонения ($\delta\rho_{l\,(7)}$, $\delta\rho_{l\,(5)}$) лежат в диапазонах: ($-0.17<\delta\rho_{l\,(7)}< 0.18$) %, ($0<\delta\rho_{l\,(5)}<0.05$) % (рис. 1), а отклонения $\delta\rho_{l\ exp}$ расположены в диапазоне ($-0.18< \delta\rho_{l\,exp}< 0.2$) %. Если учесть (неравенства ($|\delta\rho_{l\,(5)}|_{max}<|\delta\rho_{l\,(7)}|_{max}<|\delta\rho_{l\,exp}|_{max}$), включающие максимальных модули отклонений, и погрешность $\delta\rho_{l\,[1]}= 0.10$ %, то можно внести следующие границы:

а) $\delta\rho_{lx}=|\delta\rho_{l\,exp}|_{\max}+ \delta\rho_{l\,[1]}\approx0.3$ %, здесь $\delta\rho_{lx}$- граница, ниже которой располагаются указанные максимальные модули,

б) $x_3= \rho_{l\,(13)}(1 -100\ \delta\rho_{lx})$, $x_4= \rho_{l\,(13)}(1 +100\ \delta\rho_{lx})$, здесь x_3 - граница, выше которой располагаются $\rho_{l\,(4)}$ и $\rho_{l\,(7)}$, x_4 - граница, ниже которой располагаются $\rho_l(\tau)$ (7) и $\rho_l(\tau)$ (4).

С учетом полученных границ можно сформулировать гипотезу *A*: «Вблизи КТ реальные ($\rho_{l\,real}$, *T*) данные расположены в диапазоне значений ($x_3 <\rho_{l\,real}< x_4$) при температурах $4\ 10^{-4}<\tau< 5\ 10^{-3}$». При уменьшении τ в интервале $6\cdot10^{-6} <\tau<4\ 10^{-4}$ значение $\delta\rho_{l\,x}$ увеличивается до $\delta\rho_{l\,x}\approx1.0$ %, а соответственно этому уменьшается значение x_3 и увеличивается значение x_4.

Список литературы

1. Wang L., Zhao W., Wu L., Li L., Cai J. Improved renormalization group theory for critical asymmetry of fluids // J. Chem. Phys. 139, 124103 (2013).
2. Zhou Z., Cai J., Hu Y. // Molecular Phys. 2022. V. 120. Art. No. e1987541.
3. Duschek W., Kleinrahm R., Wagner W. Measurement and correlation of the (pressure, density, temperature) relation of carbon dioxide. II. Saturated-liquid and saturated-vapour densities and the vapour pressure along the entire coexistence curve // J. Chem. Thermodyn. 1990. V. 22. P. 841–864.
4. Span R., Wagner W. A New Equation of State for Carbon Dioxide Covering the Fluid Region from the Triple-Point Temperature to 1100 K at Pressures up to 800 MPa // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1996. V. 25. P. 1509–1596.
5. Устюжанин Е.Е., Очков В.Ф., Рыков В.А. и др. // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30. № 3. С. 591.
6. Ustyuzhanin E. E., Rykov S. V. et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2025, Vol. 89, No. 11, P. 2118–2123.
7. V. Kudryavtseva, S. V. Rykov, V. A. Rykov, and E. E. Ustyuzhanin. Analysis of the SF_6 Phase Equilibrium Line Based on Scale Theory and the Clausius–Clapeyron Equation. High Temperature, 2023, Vol. 61, No. 3, pp. 210-217. DOI: 10.31857/S0040364423030158
8. И. В. Кудрявцева, С. В. Рыков, Е. Е. Устюжанин, В. А. Рыков. Метод расчета линии фазового равновесия диоксида углерода с привлечением теории ренормализационной группы.

УДК 536.7

Н.Н. Середкин, К.В. Хищенко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,
125412, Москва, Ижорская, 13, стр. 2

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СИЛЬНОМ УДАРНОМ СЖАТИИ

Знание поведения композитных материалов в широком диапазоне давлений и температур необходимо для проектирования элементов конструкций, предназначенных для работы в экстремальных условиях высокоскоростных столкновений и больших тепловых нагрузок. При проведении гидродинамического расчета таких процессов требуются адекватные уравнения состояния, обеспечивающие замыкание системы уравнений движения вещества [1] в широком диапазоне реализуемых термодинамических параметров.

В настоящей работе представлены широкодиапазонные уравнения состояния, описывающие термодинамику композиционных материалов (композитов из эпоксидной смолы, карбидов и оксидов металлов) при высоких давлениях и температурах. Уравнения состояния компонентов построены в форме термодинамического потенциала свободной энергии, через который определяются калорическое и термическое уравнения состояния с помощью соотношений термодинамики [2]. Вычисление термодинамических свойств композитов основывается на уравнениях состояния их компонентов, находящихся в механическом и термическом равновесии друг с другом [3]. Параметры (константы) уравнений состояния для каждого компонента подобраны из условия наилучшего согласия с имеющимися данными из экспериментов по ударному сжатию. Проведенные для композитов (смесей с заданными долями компонентов) расчеты ударных адиабат показали адекватность этого подхода результатам ударно-волновых экспериментов в широком диапазоне давлений и температур.

Разработанные уравнения состояния композиционных материалов, как и их компонентов, могут быть использованы для моделирования различных теплофизических процессов, протекающих при нагружении в сильных ударных волнах.

Список литературы

1. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.
2. Базаров И.П. Термодинамика. М.: Высшая школа, 1991.

3. Середкин Н.Н., Хищенко К.В. Уравнение состояния сплава гафния и циркония при высоких давлениях и температурах в ударных волнах // ТВТ. 2024. Т. 62. № 4. С. 513–517.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-19-00944, https://rscf.ru/project/25-19-00944/*).*

N.N. Seredkin, K.V. Khishchenko

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
Russia, 125412, Moscow, Izhorskaya, 13 Bldg 2

THERMODYNAMIC PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS UNDER STRONG SHOCK COMPRESSION

The work is carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project № 25-19-00944, https://rscf.ru/project/25-19-00944/*).*

УДК 536.7

К.В. Хищенко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,
125412, Москва, Ижорская, 13, стр. 2

ЭНТРОПИЯ В МОДЕЛЯХ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

При интенсивном импульсном воздействии в веществе могут быть достигнуты состояния с высокими значениями внутренней энергии на единицу массы. В зависимости от условий процесса воздействия при этом давление может так же увеличиться либо остаться неизменным. В частности, в адиабатическом процессе сжатия вещества в ударной волне давление возрастет вместе с удельной внутренней энергией (как и удельной энтропией), тогда при последующей разгрузке вещество будет расширяться изоэнтропически. Для численного моделирования динамики подобных процессов требуется знать уравнение состояния вещества во всей реализуемой области изменения термодинамических параметров.

В настоящей работе рассматриваются различные модели уравнений состояния для материалов, основанные на разных характеристических функциях от разных термодинамических переменных. Так, свободная энергия есть характеристическая функция от переменных объема и

температуры, а внутренняя энергия – от объема и энтропии. В первом случае энтропию можно найти как производную свободной энергии по температуре при постоянном объеме, взятую со знаком минус. Во втором случае энтропия предполагается параметром, задаваемым явно. Рассматривается также случай, когда энтропия сама используется в качестве характеристической функции от естественных переменных внутренней энергии и объема.

Проводится сопоставление результатов расчетов для металлических материалов (алюминий, железо, медь) с помощью уравнений состояния на основе последнего подхода с данными из экспериментов с волнами ударного сжатия и изоэнтропического расширения. Это сопоставление демонстрирует адекватность предложенных уравнений состояния для металлов имеющимся данным.

Представленные модели термодинамики могут быть использованы при решении различных задач численного моделирования процессов интенсивного импульсного воздействия на металлические материалы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-19-00944, https://rscf.ru/project/25-19-00944/*).*

K.V. Khishchenko

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
Russia, 125412, Moscow, Izhorskaya, 13 Bldg 2

ENTROPY IN MODELS OF EQUATIONS OF STATE FOR MATERIALS UNDER INTENSE PULSE EFFECTS

The work is carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project № 25-19-00944, https://rscf.ru/project/25-19-00944/*).*

СОДЕРЖАНИЕ

XV теплофизический семинар, посвященный памяти Б.П. Жилкина

Плотников Л.В.
Научные достижения профессора Жилкина Бориса Прокопьевича 6

Бусов К.А.
Влияние геометрии, угла среза и угла наклона канала на вскипание жидкости 8

Волосников Д.В., Скрипов П.В.
Перегрев воды в условиях импульсного локального тепловыделения 10

Плотников Л.В., Шурупов В.А., Давыдов Д.А.
Газодинамическое совершенствование структуры потока в цилиндре поршневого двигателя в процессе впуска 12

Ситдыков А.А., Волосников Д.В
Экспериментальное моделирование теплоотдачи в теплоноситель на основе водного раствора борной кислоты и антикоррозионных добавок 14

Старостин А.А., Шлеймович Е.М.
Оптические методы в теплофизических исследованиях Б.П. Жилкина 16

XVI теплофизический семинар, посвященный 95-летию Яна Зенгерса

Jan. V. Sengers
Fifty years of collaboration on thermophysical properties with russian scientists 22

Skripov P.V.
Thermophysical seminar dedicated to the 95th anniversary of Jan Sengers: opening remarks 37

Sazhin S.S., Barsukov A.V., Terekhov V.V.
New approaches to modelling heating and evaporation of liquid films 38

Lin Chen
Crossing Pseudo-Critical: New Experiments and Quantifications 39

Volosnikov D.V.
Heat transfer in the course of water superheated states decay 40

Антонов Д.В.
Тепломассоперенос в гетерогенных каплях жидкостей при интенсивных фазовых превращениях 44

Базаев Э.А., Базаев А.Р., Джаппаров Т.А.-Г., Османова Б.К., Абдулагатов И.М.
PVTX измерения и критические свойства системы 1-пропанол+н-октан 46

Беляков М.Ю., Батырова Р.Г., Ибавов Н.В., Алиев А.М., Абдулагатов И.М.
Асимптотическое поведение линии Видома для изохорной теплоемкости сверхкритических флюидов в рамках масштабной теории завершенного скейлинга. Экспериментальная проверка 48

Боярских К.А., Хищенко К.В.
Уравнения состояния металлических жидкостей вблизи критической точки фазового перехода жидкость–пар 52

Губин А.А., Антонов Д.В.
Моделирование нагрева капель методом фазового поля 54

Мелких А.В, Скрипов П.В.
Малые примеси воды в углеводородах: фазовые переходы жидкость-жидкость и интенсификация теплоотдачи 56

Обручкова Л.Р., Боярских К.А., Середкин Н.Н., Хищенко К.В.
Некоторые уравнения состояния свинца в волнах ударного сжатия и изоэнтропического расширения 58

Русанов Б.А., Сидоров В.Е., Попель П.С., Симонов Д.К., Портнягин В.П., Русанова А.И., Сабирзянов А.А., Чугунов П.А.
Физические свойства многокомпонентных сплавов в твёрдом и жидком состояниях 60

Рыков С.В., Кудрявцева И.В., Устюжанин Е.Е., Рыков В.А.
Некоторые методы прогнозирования плотнрости жидкости и плотности газа на линии насыщения в окрестности критической точки CO_2 и SF_6 62

Середкин Н.Н., Хищенко К.В.
Термодинамические свойства композитных материалов при сильном ударном сжатии 67

Хищенко К.В.
Энтропия в моделях уравнений состояния материалов при интенсивных импульсных воздействиях 68

Содержание 70

Подписано в печать 19.05.2026.
Формат бумаги 60×84 1/16. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 4,19. Заказ 20893. Тираж 22 экз.

Отпечатано в ООО Универсальная Типография «Альфа Принт»
620049, г. Екатеринбург, переулок Автоматики, 2ж
Тел.: 8 (800) 300-16-00
www.alfaprint24.ru