ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2025, № 2, с. 145–151

ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 536.2.08

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЖИДКОСТЕЙ, ГАЗОВ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО НАГРЕВА

© 2025 г. Ф. Р. Габитов[a], И. Р. Габитов[a], Л. Ю. Яруллин[a, *], В. Ф. Хайрутдинов[a], И. Ш. Хабриев[a], И. М. Абдулагатов[b]

[a] *Казанский национальный исследовательский технологический университет Россия, 420015, Казань, ул. К. Маркса, 68*

[b] *Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики Филиал Объединенного института высоких температур Российской академии наук Россия, 367030, Махачкала, просп. И. Шамиля, 39-а*

**e-mail: yarul.lenar@gmail.com*

Поступила в редакцию 16.10.2024 г.
После доработки 22.11.2024 г.
Принята к публикации 17.01.2025 г.

Статья посвящена методам исследования теплопроводности и, в частности, методу импульсного нагрева. Описана классификация методов исследования теплопроводности, их преимущества и недостатки. Приведены обобщенная информация о зондах, применяемых в экспериментальных установках метода импульсного нагрева, а также описание зонда, использованного в реализованной установке. Представлены экспериментальные термограммы с анализом факторов, влияющих на результат, а также варианты оценки их вклада в общий результат измерений. Приведены результаты апробации установки и сравнение полученных значений коэффициентов теплопроводности со стандартными значениями, представленными в литературе.

DOI: 10.31857/S0032816225020191, **EDN:** GLLPNL

1. ВВЕДЕНИЕ

Возросшая потребность промышленности и науки к объему и точности данных о теплофизических свойствах технически важных веществ и материалов требует создания высокопроизводительных прецизионных методов комплексного измерения свойств. Методы измерения коэффициента теплопроводности делятся на стационарные и нестационарные. Если стационарные методы [1–7] позволяют измерять только коэффициент теплопроводности, то нестационарные методы позволяют дополнительно определять значения коэффициента температуропроводности, теплоемкости, тепловой активности и даже вязкости (последнее, – если исследуемая среда находится в движении). И все это может быть реализовано в одном эксперименте [8–15].

Метод импульсно нагреваемого зонда [16–25] обеспечивает высокоскоростные измерения теплофизических свойств (ТФС) в течение одного импульса нагрева зонда (длительностью от сотых долей до десятков секунд); большую производительность и прецизионность (неопределенность около 1%); проведение измерений в условиях, недоступных для стационарных методов (динамические процессы, химические реакции, фазовые переходы, в том числе в околокритической области параметров состояния) [8, 9, 25]; комплексность исследования – возможность в течение одного импульса нагрева измерить λ, a, χ, ν; миниатюризацию измерительных ячеек и установок, что позволяет измерять ТФС предельно малых (до 1 см^3) объемов вещества. При использовании данного метода с указанным устройством отсутствует необходимость

в термостатировании или поддержании постоянства давления исследуемого вещества и полностью исключается возможность возникновения естественной конвекции. Опыт показывает, что начало конвекции наблюдается в жидкостях и газах при времени нагрева τ больше 1 с при перегреве зонда 1 K.

Если глубина проникновения температурных волн в исследуемое вещество меньше длины свободного пробега фотона, то зондируется прозрачная среда и поправка в значения коэффициента теплопроводности на радиационный перенос теплоты может быть рассчитана по формуле Стефана–Больцмана. Опыт показывает, что, например, органические жидкости с числом атомов углерода до 16 в жидком или газообразном состоянии при длительности импульса нагрева $\tau \leqslant 0.1$ с прозрачны для теплового излучения [16–25]. Поскольку излучающая поверхность измерительного зонда мала (у линейного зонда из платиновой нити диаметр 5 мкм; у плоского источника тепла ограниченной ширины из платиновой фольги толщина 0.9 мкм и ширина 0.022 мм; длина обоих зондов порядка 100 мм), поправка на радиационный теплоперенос не превышает 1% от полного значения теплового потока.

В некоторых работах, например [25], методом импульсно нагреваемого зонда измерения ТФС органических жидкостей проводились в сравнительно большом интервале времени (до 3–10 с), в этих случаях можно утверждать, что на результаты оказал влияние радиационный теплоперенос. Для введения поправки на радиационный теплоперенос в этом случае нужно решать сложную задачу радиационно-кондуктивного теплообмена. Для решения этой задачи необходимо располагать сведениями по оптическим свойствам среды (спектры поглощения) и граничных поверхностей при различных температурах и давлениях. Опыт проведения расчетов показывает, что за счет переизлучения в таких полупрозрачных средах поправка на радиационный теплоперенос может превышать десятки процентов от полного значения теплового потока [14–25].

Методы одновременного определения нескольких теплофизических свойства в рамках проведения одного эксперимента имеют и коммерческое воплощение, например в системе измерения физических свойств PPMS производства Quantum Design [26]. Данное устройство представляет собой систему с открытой архитектурой и переменным температурным полем, предназначенную для выполнения различных автоматизированных измерений, в том числе для определения значений теплоемкости и коэффициентов теплопроводности образцов.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

2.1. Общая характеристика установок, реализующих метод импульсного нагрева

Установки для измерения теплофизических свойств на основе метода импульсно нагреваемого зонда могут быть использованы для быстрого и точного измерения, в том числе значений коэффициента теплопроводности и удельной объемной теплоемкости различных типов материалов: металлов, сплавов, керамики, минералов, полимеров, композитных материалов, бумажных и тканых материалов, изоляционных материалов, гелей, жидкостей, порошков, гранулированных и пастообразных материалов. Метод импульсно нагреваемого малоинерционного зонда в бесконечной среде впервые был реализован Спириным [15] в 1970–1980-х годах. В дальнейшем метод был усовершенствован применительно к исследованию фазовых переходов [25, 27–29], в том числе с применением зонда в форме спирали [29]. При прохождении тока через зонд происходит рост температуры, тепло в случае плоского зонда распространяется с обеих сторон; скорость распространения теплоты зависит от теплопередающих характеристик материала. Фиксируя время реакции зонда на изменение температуры, можно получить математическую модель для определения теплопроводности. Непосредственное значение коэффициента теплопроводности определяется программным обеспечением через изменение напряжения на зонде, включенном в плечо мостовой схемы Уитстона [8–10].

Для метода импульсного нагрева используется два вида зондов: свободные и напыленные металлом на подложку (рис. 1, 2) [25, 28]. Последние менее подвержены повреждениям при механическом воздействии, они изготавливаются методом вакуумного напыления металла на подложку с последующим фототравлением. Напыляются такие металлы, как алюминий, никель и др. Толщина напыления лежит в пределах от 100 Å до 10 мкм, ширина дорожек металла – от десятков мкм до 1 мм. Расстояние между дорожками

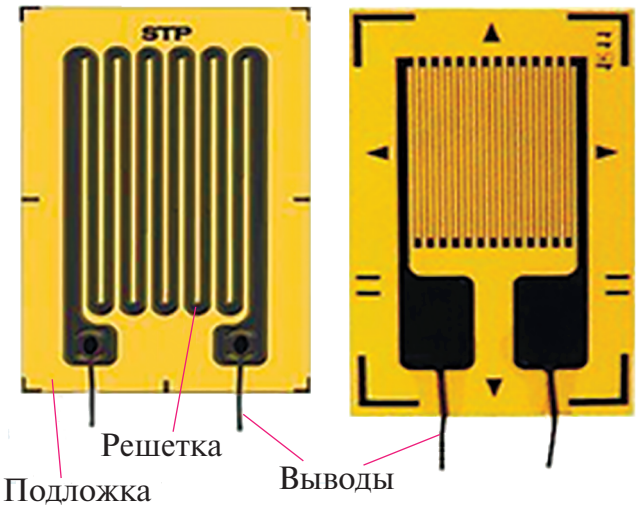

Рис. 1. Пример плоских зондов ограниченной ширины с напылением металлической резистивной дорожки на подложку.

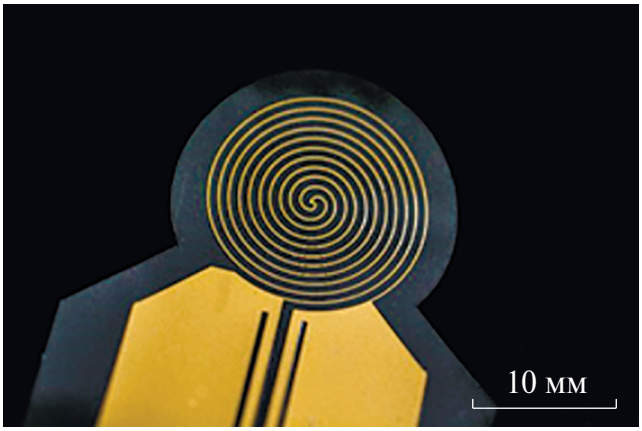

Рис. 2. Пример плоских зондов ограниченной ширины с металлической резистивной дорожкой в виде двойной спирали на двусторонней подложке.

выбирается из условия, чтобы температурные волны, движущиеся по подложке от двух соседних дорожек, за время измерения (равное длительности импульса) не наложились друг на друга. Суммарная длина дорожек может доходить до 1 м. Перемычки между дорожками и контактные площадки, как правило, имеют большую толщину и изготавливаются из хорошо проводящего электричество металла, например из меди. Электрическое сопротивление зонда в зависимости от металла, толщины напыления, ширины и длины дорожек доходит до 2000 Ом. Зонд одновременно является как источником тепла, так и термометром сопротивления. В качестве материала подложки используются ситалл, лавсан, полиамид и др. вещества, толщина варьируется в диапазоне от десятков до сотен микрон. Подложка устанавливается как с одной, так и с двух сторон. Теплота, выделяемая на металлической пленке, отводится как исследуемой средой, так и подложкой – пропорционально их коэффициентам теплопроводности.

Под действием импульса напряжения металлическая пленка нагревается. Для малых длительностей импульса нагрева можно пренебречь конечностью ширины и длины пленки и рассматривать задачу как одномерную. Уравнение для определения теплопроводности исследуемого вещества имеет следующий вид [30]:

$$\lambda = \frac{q}{2\pi} \frac{1}{\mathrm{tg}\varphi} - \lambda_n . \qquad (1)$$

При этом коэффициент теплопроводности $\lambda_п$ должен быть известен.

2.2. Описание измерительного зонда созданной экспериментальной установки

В качестве проводящего металла использовался алюминий, напыленный на полимерную подложку, толщиной 200 Å, шириной 1 мм и длиной 100 мм. Электрическое сопротивление зонда при комнатной температуре составляло 200 Ом. В качестве материала подложки зонда использовался ситалл. Для получения чувствительности такого зонда, сравнимой с чувствительностью свободного зонда, необходимо было увеличить перегрев зонда до 10 K. Такой перегрев ставит под сомнение правомерность использования уравнения Фурье, положенного в основу метода импульсного нагрева. При выводе уравнения Фурье полагалось, что физические свойства исследуемой среды не зависят от температуры. Теплопроводность же лавсана (0.152 Вт/м · K при температуре 297 K) близка к теплопроводности большинства исследованных органических жидкостей (0.09–0.18 Вт/м · K) [14–25, 27, 28].

Перед и после использования как свободные, так и напыленные зонды тарировались по образцовому платиновому термометру сопротивления ПТС-10. В роли линейного зонда выступала платиновая проволока радиусом 2.5 мкм и длиной 100 мм. При отношении длины к радиусу 40 000 реализуется бесконечный линейный источник радиального теплового потока постоянной мощности.

Величина tg φ определяется по термограмме (рис. 3) обработкой экспериментальных точек методом наименьших квадратов после выбора

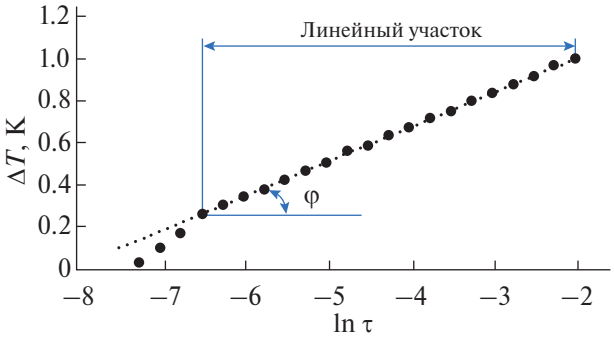

Рис. 3. Термограмма свободного линейного зонда в среде н-гексадекана при давлении 0.1 МПа и температуре 325 K.

границ линейного участка. Отклонение первых точек термограммы от линейного закона связано с влиянием на температуру зонда собственной теплоемкости материала зонда. Отклонение от линейного закона последних точек свидетельствует о возникновении естественной конвекции в исследуемой среде. При малых временах существования температурного поля (при длительности импульса нагрева порядка 100 мс) гидродинамическое течение не успевает развиться. Даже если естественная конвекция будет иметь место, то на результаты измерения ТФС она не повлияет из-за наличия на поверхности зонда малоподвижного пограничного слоя [23].

Линейным зондом было измерено значение коэффициента теплопроводности н-гексадекана при давлении 0.1 МПа и температуре 325 K, которое составило 0.1359 Вт/м·K. Измеренное значение λ в пределах неопределенности 2.5 % совпадает с молекулярными значениями λ, приведенными в справочнике [31], а также в базе данных NIST [32]. При указанной длительности импульса нагрева глубина проникновения температурной волны в н-гексадекан была меньше длины свободного пробега фотона. Такие слои исследуемой среды можно считать прозрачными для ИК-излучения. Поправка на излучение вводилась как для прозрачной среды, и при температуре 325 K она не превышала 0.01% [21, 22].

На рис. 4 приведены экспериментальные термограммы. Зонд попеременно помещался в воздух, н-октан и между двумя пластинами из оптического кварцевого стекла КВ. Величина тока выбиралась такой, чтобы перегрев зонда в конце импульса напряжения постоянного тока длительностью 470 мс составлял 1 K.

На снятых при температуре 292 K термограммах для указанных веществ имеется характерный излом при ln τ = –3.5 или τ = 30 мс с начала подачи импульса. Излом термограмм вызван выходом тепловой волны из лавсановой пленки. Зная величину коэффициента температуропроводности лавсана при температуре 292 K ($a = 8.2 \cdot 10^{-8}$ м^2/с) и используя уравнение для глубины проникновения температурного поля в среду (2), можно вычислить толщину подложки $l = 49.6 \cdot 10^{-6}$ м. При вычислении использованы значения плотности ρ и изобарной теплоемкости C_P, приведенные в работах [33–35].

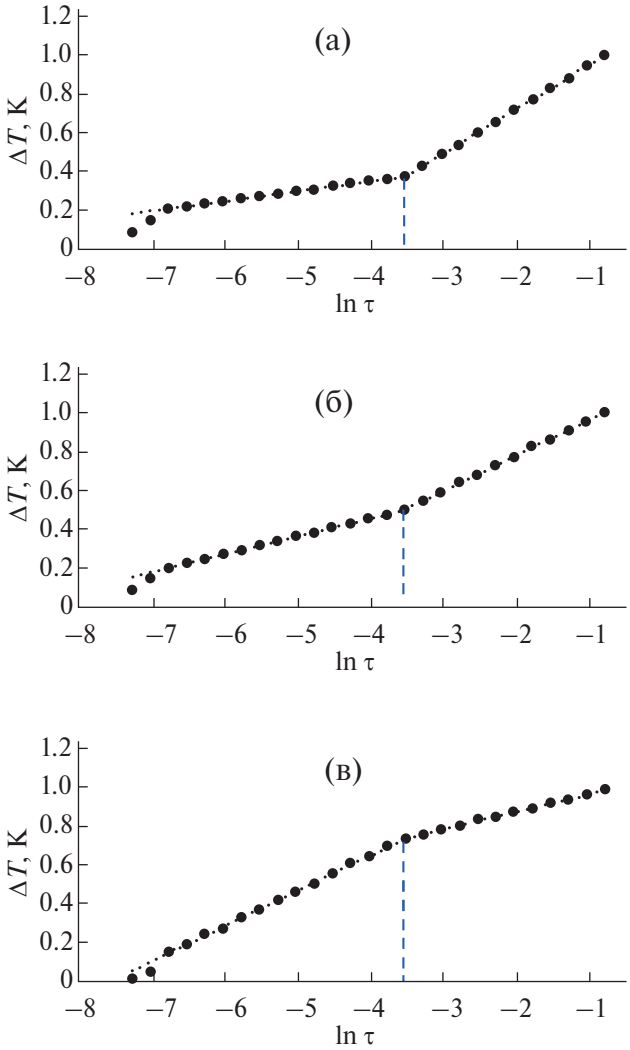

Рис. 4. Термограмма плоского зонда ограниченной ширины, напыленного алюминием на лавсановой подложке при давлении 0.1 МПа и температуре 292 K: **а** – в среде воздуха, **б** – в среде н-октана, **в** – между пластинами из кварцевого стекла марки КВ.

$$l = \sqrt{a \cdot \tau} \qquad (2)$$

По снятым термограммам (рис. 4) были определены значения коэффициентов теплопроводности

исследованных веществ. Значение коэффициента теплопроводности лавсановой подложки – $\lambda_п$ = 0.152 Вт/(м · К) при 293 К [33]. Величину $\lambda_п$ можно также определить экспериментально, если провести измерения коэффициента теплопроводности хорошо изученного вещества, например н-октана (рис. 4б). Известно, что молекулярная теплопроводность н-октана при температуре 292 К равна 0.127 Вт/(м · К) [31]. Из первого участка термограммы (рис. 4б) $\ln \tau = -6.75 \div -3.5$ по уравнению (1) найдем сумму $\lambda + \lambda_п = 0.276$ Вт/(м · К). Отсюда $\lambda_п = 0.151$ Вт/(м · К), что согласуется со справочными значениями. Подставляя найденное экспериментально значение $\lambda_п$ в уравнение (1) и используя первые участки термограмм (рис. 4а, в), определяем теплопроводность воздуха λ = 0.254 Вт/(м · К) и кварцевого стекла λ = 1.36 Вт/(м · К) при температуре 292 К. В работе [31] рекомендуемое значение λ воздуха при этой температуре составляет 0.0256 Вт/(м · К), а в работе [34] – значение λ кварцевого стекла марки КВ равно 1.38 Вт/(м · К). Наблюдается удовлетворительное согласие.

Используя вторые участки термограмм (рис. 4а, б, в) $\ln \tau = -3.5 \div -0.75$, получаем для воздуха λ = 0.0255 Вт/(м · К), для н-октана λ = 0.128 Вт / (м · К) и для кварцевого стекла λ = 1.37 Вт/(м · К). Полученные значения удовлетворительно согласуются с данными, приведенными выше. Неопределенность измерений коэффициента теплопроводности зондом ограниченной ширины на лавсановой подложке составляет для второго участка термограммы 3%, а для первого участка 4%.

На рис. 2 приведены варианты плоских зондов ограниченной ширины с металлической резистивной дорожкой в виде двойной спирали на двусторонней подложке. Двойная спираль (бифилярная намотка) обеспечивает нейтрализацию магнитных полей при движении электрического тока по проводнику. Подложка с обеих сторон закрывает резистивную дорожку, обеспечивая электрическую изоляцию между зондом и исследуемой средой. Во время испытаний зонд помещается посередине тестируемого образца. При прохождении тока через зонд происходит рост температуры, тепло распространяется с обеих сторон образца зонда. При этом тепловая волна зондирует сначала подложку, а затем исследуемый образец. Если толщины подложек с обеих сторон резистивной подложки одинаковы, то получаем термограмму, подобную изображенной на рис. 4. Также наблюдается характерный излом термограммы, вызванный выходом тепловой волны из подложки в исследуемую среду.

Зонды, приведенные на рис. 2, использовались для измерения коэффициента теплопроводности экструдированных пенополистиролов. Структура экструдированного пенополистирола представляет собой замкнутые ячейки одинакового размера от 0.1 до 0.2 мм. Поскольку в твердых телах отсутствует передача теплоты конвекцией, нет необходимости ограничивать длительность импульса нагрева. Если твердое тело непрозрачно для теплового излучения, то отсутствует лучистый перенос теплоты.

Характеристики зондов следующие: ширина резистивной металлической дорожки 0.1 мм, расстояние между соседними дорожками 0.52 мм, толщина каждого слоя подложки из полиамида 35 мкм, электрическое сопротивление при комнатной температуре 1.6 Ом. Зная расстояние между соседними дорожками и коэффициент температуропроводности полиамида $1.25 \cdot 10^{-7}$ м/с^2 при температуре 293 К [35], можно определить по зависимости (2) максимальную длительность импульса нагрева из условия, чтобы температурные волны, движущиеся по подложке от двух соседних дорожек, не наложились друг на друга. Это время составит 540 мс. Минимальное время, с которого начинается зондирование исследуемой среды тепловой волной, вышедшей из слоя подложки, определяется так же по зависимости (2). При толщине слоя подложки из полиамида 35 мкм это время составит 9.8 мс.

При измерении коэффициента теплопроводности пористых тел, таких как пенополистирол, необходимо обеспечить как можно большую глубину проникновения тепловой волны в исследуемую среду. Это обеспечит охват большего количества пор тепловой волной и снизит неопределенность измерений λ. Также из-за увеличения временной базы (рис. 3, 4) большая длительность импульса нагрева зонда способствует снижению неопределенности определения из термограммы tg φ и в целом значения λ. Особенно это важно, когда обработка (линеаризация) термограммы ведется в автоматизированном режиме.

В табл. 1 приведены характеристики образцов материалов, использованных при измерении коэффициента теплопроводности плоским

Таблица 1. Характеристики образцов пенополистирола и результаты измерения коэффициента теплопроводности

Характеристика		Образец 1	Образец 2
Материал		Экструдированный пенополистирол	Экструдированный пенополистирол
Марка		УКНА XPS	XPS ТЕХНОПЛЕКС
Производитель		“ПЕНОПЛЭКС”	“ТехноНиколь”
Плотность, кг/м^3		22	28
Толщина, мм		20	50
λ_{25}, Вт/(м · К)	Данные производителя	0.034	0.032
	Результаты настоящей работы	0.0345 ± 0.0009	0.0334 ± 0.0006

зондом ограниченной ширины с металлической резистивной дорожкой в виде двойной спирали на двусторонней подложке.

3. НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

Степень достоверности результатов, получаемых с использованием установки, определялась в соответствии с рекомендациями по выражению неопределенности измерений ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 [36]. Анализ неопределенности результатов измерения проведен как по типу B (нестатистическими методами) через указанный производителем интервал возможных значений величины на основе априорного предположения о прямоугольной функции распределения, так и по типу A (статистическими методами) через определение таких характеристик случайной величины, как математическое ожидание, выборочная дисперсия, выборочное стандартное отклонение и стандартное отклонение среднего значения.

Расширенная неопределенность результатов измерения коэффициентов теплопроводности с коэффициентом охвата $t_{95(\nu)} = 1.96$ при уровне доверия 95% составила $9.08 \cdot 10^{-4}$ Вт/(м · К) или 2.64%.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод импульсно нагреваемого зонда отвечает новым возросшим требованиям, предъявляемым к теплофизическому эксперименту. В сочетании с компьютерными сбором и обработкой информации он обеспечивает комплексность измерений в одном эксперименте, прецизионность результатов, решение разнообразных задач в теплотехнике. Реализация в описанном виде позволяет проводить измерение теплопроводности жидкостей и газов при температурах 293–593 К и давлениях до 30 МПа, а также твердых тел при атмосферном давлении.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания № 075-01508-23-00 (сверхкритические флюидные технологии в переработке полимеров (FZSG-2023-0007)) с использованием аналитического оборудования центра коллективного пользования “Наноматериалы и нанотехнологи” ФГБОУ ВО “КНИТУ”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Габитов И.Р., Шарафутдинов Р.А., Зарипов З.И.* // Вестник КГТУ. 2018. Т. 74. № 4. С. 5.
2. *Джаддоа А.А., Габитов И.Р., Саламатов Д.Ю., Зарипов З.И.* // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 22. С. 8.
3. *Бикташев Ш.А., Накипов Р.Р., Габитов И.Р., Усманов Р.А., Зарипов З.И.* // Вестник технологического университета. 2014. Т. 17. № 4. С. 106.
4. *Габитов И.Р., Накипов Р.Р., Зарипов З.И.* // Вестник технологического университета. 2014. Т. 17. № 23. С. 109.
5. *Габитов И.Р., Накипов Р.Р., Бикташев Ш.А., Зарипов З.И., Усманов Р.А., Амирханов Р.Д.* // Вестник

технологического университета. 2014. Т. 17. № 6. С. 113.
6. *Сирота А.М., Латунин В.И., Беляева Г.М.* // Теплоэнергетика. 1976. № 5. С. 70.
7. *Le Neindre B., Lombardi G., Desmarest P., Kayser M., Sabirzianov A., Gabitov F., Gumerov F., Garrabos Y.* // Fluid phase equilibria. 2018. V. 474. P. 60. https://doi.org/10.1016/j.fluid.2018.07.011
8. *Булатова Т.Г., Габитов Ф.Р., Тарзиманов А.А., Акимов В.Н.* СССР Патент 1157428, 1985.
9. *Габитов Ф.Р., Юзмухаметов Ф.Д., Тарзиманов А.А.* РФ Патент 2209417, 2003.
10. *Габитов Ф.Р., Юзмухаметов Ф.Д., Тарзиманов А.А. и др.* РФ Патент 2233440, 2004.
11. *Assael M.J., Antoniadis K.D., Wakeham W.A.* // Int. J. Thermophys. 2010. V. 31. P. 1051. https://doi.org/10.1007/s10765-010-0814-9
12. *Abdulagatov I.M., Assael M.J.* Hydrothermal experimental data / Ed. by V.M. Valyashko. Chichester: Wiley, 2008. P. 227. https://doi.org/10.1002/9780470094679.ch5
13. *Assael M.J., Antoniadis K.D.* // Thermal conductivity 30. Thermal expansion 18. Conference Proceedings. Pittsburg, 2009. P. 65.
14. *Кравчун С.Н., Филиппов Л.П.* Тепло- и массообмен в химической технологии: Межвуз. Сб. 1981. С. 68.
15. *Спирин Г.Г.* // ИФЖ. 1980. Т. 38. № 3. С. 403.
16. *Габитов Ф.Р., Тарзиманов А.А., Юзмухаметов Ф.Д., Шарафутдинов Р.А., Шакиров Н.З.* // ТВТ. 2002. Т. 40. № 4. С. 568.
17. *Тарзиманов А.А., Габитов Ф.Р.* // ТВТ. 2004. Т. 42. № 2. С. 236.
18. *Тарзиманов А.А., Габитов Ф.Р., Шарафутдинов Р.А.* // Метрология. 1989. № 1. С. 29.
19. *Тарзиманов А.А., Габитов Ф.Р.* // Инженерно-физический журнал. 1989. Т.56. № 1. С. 92.
20. *Тарзиманов А.А., Габитов Ф.Р.* // Теплоэнергетика. 1989. № 7. С. 5.
21. *Tarzimanov A.A., Gabitov F.R., Sharafutdinov R.A., Yuzmukhametov F.D.* // High Temp. High Press. 1993. V. 25. P. 67.
22. *Тарзиманов А.А., Габитов Ф.Р., Поникарова И.Н.* // ТВТ. 1998. Т. 36. № 3. С. 517.
23. *Тарзиманов А.А., Габитов Ф.Р.* // ТВТ. 2004. Т. 42. № 2. С. 236.
24. *Perkins R.A., Roder H.M., Nieto de Castrol C.A.* // J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 1991. V. 96. P. 247. https://doi.org/10.6028/jres.096.014
25. *Shakirov N.Z., Gabitov F.R., Yuzmukhametov F.D., Sharafutdinov R.A., Gabitov R.F., Gumerov F.M.* // Res. J. Appl. Sci. 2020. V. 10. P. 358.
26. Официальный сайт компании Quantum Design: https://www.qdusa.com/products/ppms.html
27. *Wada Y., Nagasaka Y., Nagashima A.* // Int. J. Thermophys. 1985. V. 6. P. 251. https://doi.org/10.1007/BF00522147
28. *Тарзиманов А.А., Габитов Ф.Р., Поникарова И.Н., Юзмухаметов Ф.Д.* // Инженерно-физический журнал. 1992. Т. 63. № 4. С. 436.
29. *Gustafsson S.E.* // Rev. Sci. Instrum. 1991. V. 62. P. 797. http://dx.doi.org/10.1063/1.1142087
30. *Дроздов С.А., Салохон В.Ф.* // Инженерно-физический журнал. 1972. Т. 22. № 6. С. 1118.
31. *Варгафтик Н.Б., Филиппов Л.П., Тарзиманов А.А., Тоцкий Е.Е.* Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. Москва: Энергоатомиздат. 1990.
32. *Lemmon E.W., Huber M.L., McLinden M.O.* NIST standard reference database. 2002. V. 7.
33. *Катаев В.М., Попов В.А., Солпин Б.И.* Справочник по пластическим массам. Москва: Химия. 1975.
34. *Чиркин, В.С.* Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник. Москва: Атомиздат. 1968.
35. *Новиченок Н.Л., Шульман З.П.* Теплофизические свойства полимеров. Минск: Наука и техника. 1971.
36. ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008.