

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Обзорная статья

УДК 543.575:543.68::006.91–027.21

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-99-111>



# Измерения теплового расширения при высоких температурах: состояние и перспективы повышения точности средств измерений

Т. А. Компан ✉, С. В. Кондратьев

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»,  
г. Санкт-Петербург, Россия  
✉ [t.a.kompan@vniim.ru](mailto:t.a.kompan@vniim.ru)

**Аннотация:** В статье проанализировано современное состояние и перспективы развития высокотемпературной дилатометрии. Приведены основные определения и понятия. Рассмотрены основные типы дилатометров, использующих контактные (механические) и дистанционные (оптические) методы измерений; описаны некоторые конкретные установки. Проанализированы ограничивающие факторы известных методов. Технический прогресс, продуцирующий материалы с новыми свойствами, требует создания подходов для исследования характеристик и возможностей применения таких материалов, а также, возможно, прогнозирования направлений современного материаловедения. Проанализированы технические приемы, которые могут обеспечить дальнейший прогресс в технике высокотемпературной дилатометрии. Представленный обзор обращен к исследователям – метрологам, материаловедам, физикам, работающим в области дилатометрии, а также к специалистам, создателям средств измерений.

**Ключевые слова:** дилатометр, интерференция, температурный коэффициент линейного расширения, температурная зависимость

**Для цитирования:** Компан Т. А., Кондратьев С. В. Измерения теплового расширения при высоких температурах: состояние и перспективы повышения точности средств измерений // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 4. С. 99–111. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-99-111>

Статья поступила в редакцию 30.09.2025; одобрена после рецензирования 15.11.2025; принята к публикации 25.12.2025.

## MODERN METHODS OF ANALYSIS OF SUBSTANCES AND MATERIALS

Review Article

# Thermal Expansion Measurements at High Temperatures: State and Prospects for Enhancing Measurement Accuracy

Tatiana A. Kompan ✉, Sergei V. Kondratev

D. I. Mendeleev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia

✉ t.a.kompan@vniim.ru

**Abstract:** The review analyzes the current state and prospects for the development of high-temperature dilatometry. Basic definitions and concepts are given. The main types of dilatometers using contact (mechanical) and remote (optical) measurement methods are considered; some specific installations are described. Limiting factors of known methods are analyzed. Technological progress, which produces materials with new properties, requires the creation of approaches to study the characteristics and application possibilities of such materials, as well as, possibly, forecasting the directions of materials science. Techniques that can ensure further progress in high-temperature dilatometry technology are analyzed. This review is addressed to researchers – metrologists, material scientists, physicists working in the field of dilatometry, as well as specialists who create measuring instruments.

**Keywords:** dilatometer, interference, linear thermal expansion coefficient, temperature dependence

**For citation:** Kompan TA, Kondratev SV. Thermal expansion measurements at high temperatures: state and prospects for enhancing measurement accuracy. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2025;21(4):99–111. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-99-111>

The article was submitted 30.09.2025; approved after reviewing 15.11.2025; accepted for publication 25.12.2025.

### Введение

Изучение теплового расширения – один из старейших разделов науки о материалах, наряду с разделами о прочности и упругости. Как и многие другие фундаментальные области науки, наука о тепловом расширении – dilatometria – вносила и вносит вклад в развитие других областей знаний, например, о строении твердых тел, о фазовых переходах. Но и для решения многих практических вопросов, таких как создание сложных узлов, механизмов и машин, особенно тех, которые работают в широком диапазоне температур, dilatometria как источник информации о поведении материалов остается незаменимой. Именно

поэтому, в силу ее универсальной востребованности, трудно указать конкретные области ее применения: данные о тепловом расширении необходимы во многих областях. Даже в такой, казалось бы, далекой от dilatometрии области, как твердотельная микроэлектроника, знания о тепловом расширении необходимы, чтобы в процессе функционирования структур не произошло отслаивания отличающихся материалов [1].

Цель работы – систематизировать имеющийся отечественный и международный опыт измерений теплового расширения при высоких температурах и дать возможность специалистам, работающим в данной и смежных

областях, ознакомиться с последними работами в указанной области.

### Термины и основные положения

Как правило, информация о тепловом расширении формулируется с использованием термина «температурный коэффициент линейного расширения» (ТКЛР). В силу относительной малости этого коэффициента и в связи с технологическим неудобством процесса измерения коэффициент объемного расширения твердых тел принимают равным утроенному коэффициенту линейного расширения (для анизотропных материалов это не так). Иногда тот же коэффициент формулируют как коэффициент теплового расширения (КТР); в англоязычной технической литературе (СТЕ). Это синонимы. В данной статье принято обозначение ТКЛР.

Коэффициент теплового расширения определяется как отношение относительного удлинения (изделия, материала) к интервалу температуры, вызвавшему это удлинение, и обычно обозначается как альфа,  $\alpha$ . В случае использования коэффициента объемного расширения используется следующая буква греческого алфавита – бета,  $\beta$ .

Различают ТКЛР:

- дифференциальный  $\alpha = (dL/L) / dT$ ; (1)
- интервальный  $\alpha = (\Delta L/L) / \Delta T$ . (2)

В выражениях (1, 2)  $L$ ,  $T$  – длина и абсолютная температура соответственно. Остальные математические символы имеют общепринятые значения. Для случая, когда исследуемый объект – твердое тело, использование частных производных в (1, 2) избыточно.

Геометрический смысл (1) – производная к зависимости длины от температуры при данной конкретной температуре. Геометрический смысл ТКЛР по определению (2) – наклон хорды, пересекающей эту зависимость в двух температурных точках заданного интервала  $\Delta T$ .

Коэффициент теплового расширения также и сам является функцией температуры. Более информативным способом представления информации о тепловом расширении (фактически – об удлинении) является представление данных в виде полинома зависимости длины образца от температуры. В этом случае ТКЛР – это коэффициент при первом члене разложения по малым приращениям температуры.

Частным, но наиболее важным случаем зависимости (2), является случай, когда начальная температура измерения соответствует нормальным климатическим условиям. Именно такая информация, как правило, необходима для практических целей, например, для учета искривления рельсов, изменения конфигурации сопл реактивных двигателей и т. д.

### Механизмы возникновения теплового расширения

Причины теплового расширения как физического явления к настоящему времени поняты достаточно хорошо. Корректно явление иллюстрируется с помощью диаграммы Леннарда-Джонса [2].

Атомы либо другие частицы, формирующие твердое тело, испытывают как силы притяжения между собой, так и силы отталкивания. В материале эти частицы располагаются относительно друг друга на расстояниях, при которых эти силы уравниваются. Это соответствует минимуму потенциальной энергии на диаграмме Леннарда-Джонса (рис. 1). При повышении температуры атомы приобретают дополнительную кинетическую энергию и переходят на более высокий уровень в потенциальной яме. При этом, поскольку

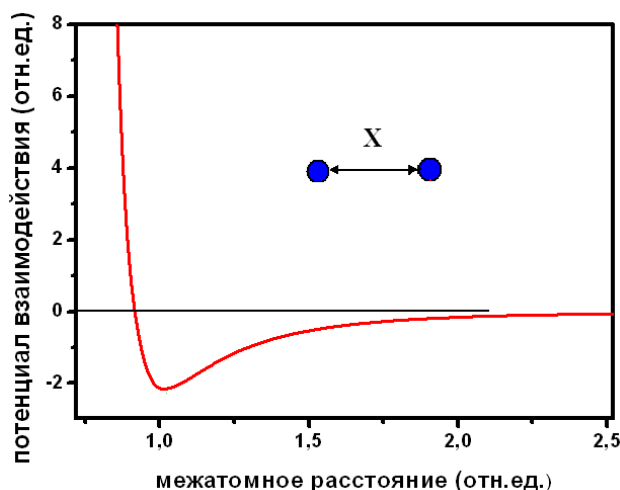


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 1. Диаграмма Леннарда-Джонса:  $X$  – расстояние между частицами, отложено по горизонтальной оси

Fig. 1. Lennard-Jones diagram:  $X$  is the distance between particles, plotted along the horizontal axis

потенциальная яма асимметрична, среднее положение частицы смещается в сторону более пологого края, что соответствует увеличению расстояния между соседними атомами.

В конкретных деталях явление теплового расширения существенно сложнее. Из общих соображений следует только характер предельных ветвей кривой Леннарда-Джонса. Сила сопротивления твердых тел сжатию экстремально возрастает при возрастании степени сжатия, и из этого следует резкий подъем кривой при малых расстояниях между атомами. При очень больших расстояниях атомы просто не взаимодействуют, и, следовательно, кривая должна асимптотически стремиться к нулю. Но какую-нибудь конкретную информацию о форме кривой в области минимума для конкретного вещества можно извлечь только из результатов опытов. Именно поэтому дилатометрия была и остается источником информации о расширении как для практики, так и для определения параметров взаимодействия атомов в конкретных материалах.

Из общих свойств теплового расширения следует упомянуть характер температурной зависимости самого ТКЛР. В типичном случае коэффициент теплового расширения растет с температурой. На то есть фундаментальные причины. Как упоминалось, расширение обусловлено асимметрией потенциальных минимумов, в которых находятся атомы. Грюнайзен показал, что второй коэффициент в полиноме, описывающем зависимость длины от температуры (коэффициент ангармонизма), позволяет связать ТКЛР и теплоемкость [3]:

$$\frac{\alpha_v}{c_v} = \frac{\gamma\beta}{V_m} = \text{const}, \quad (3)$$

где  $\alpha_v$  – изобарический ТКЛР;  $c_v$  – удельная теплоемкость;  $\gamma$  – параметр Грюнайзена;  $\beta = (\partial V / \partial P)_T / V$  – коэффициент изотермической сжимаемости металла;  $V_m$  – молекулярный объем, который практически не зависит от температуры. В свою очередь, теплоемкость твердых тел растет с ростом температуры, что связано с ростом числа фононов и тем, что они занимают все более энергичные уровни распределения [4], обуславливая рост ТКЛР при повышении температуры.

Однако подчеркнем еще раз: понимание общих закономерностей не обеспечивает необходимой точной информацией о тепловом расширении даже в простейших случаях, это может быть обеспечено только измерениями. Для конкретных материалов соотношение между ТКЛР и другими термодинамическими величинами исследуют экспериментально [5, 6]. Тем более это относится к особым случаям, когда вещество может испытывать фазовые переходы (магнитные, мартенситные, структурные), и особенно к случаям, которые прямо противоречат модели Леннарда-Джонса – случаям отрицательного теплового расширения [7–11].

### Экспериментальные методы измерений теплового расширения

Работы по изучению теплового расширения твердых тел известны, как минимум, с позапрошлого века, и за прошедшее время был накоплен значительный опыт создания установок и методик измерений ТКЛР различными методами. К настоящему времени дилатометры выпускаются серийно многими производителями.

Тем не менее, можно выделить основные группы приборов, использующих сходные приемы и аппаратуру. Основной критерий отнесения к той или иной группе – контактный или бесконтактный метод измерений. В большинстве случаев каждый конкретный метод может быть реализован как абсолютный или относительный с соответствующими изменениями в аппаратуре.

Для определения коэффициента теплового расширения требуются измерения двух физических величин – перемещения и температуры для образца материала, который подвергается соответствующему термическому циклу. В литературе содержатся сведения о многообразии экспериментальных подходов. Некоторые из них являются абсолютными, другие – относительными методами, использующими эталонный материал. О большом разнообразии подходов можно судить по различным методам, применяемым для измерений удлинения.

**Механический метод**, с помощью толкателя (рис. 2а) – наиболее простой метод измерений. В этом методе образец находится в печи, торцы образца должны быть строго параллельны и иметь высокую степень обработки

поверхностей. К торцам с некоторым усилием поджимаются толкатели, при помощи которых изменение линейных размеров образца при колебаниях температуры передается на высокоточные датчики перемещений. Измеренное удлинение является суммой растяжений образца и передающей системы.

Отсюда следует, что изначально необходимо знать значение ТКЛР передающей системы, расширение которой должно быть достаточно изучено в различных интервалах рабочей температуры. Для уменьшения искажения результата измерений систему крепления и толкатель стремятся делать из одинакового материала или из материалов с близкими

коэффициентами расширения. Тем не менее, измерения с толкателем всегда являются относительными, поскольку даже в случае одинакового материала толкателя и системы крепления часть удлинения измерительного устройства остается некомпенсированной. Как следует из анализа точностных характеристик данного метода измерений ТКЛР, погрешность измерений ТКЛР – не меньше  $\pm (6-8)\%$ .

Для достижения большей чувствительности метод с толкателем модифицируют: одновременно с исследуемым образцом в нагреваемую область помещают образец с известными свойствами, и расширение каждого из образцов отдельным толкателем передается измерительному устройству, измеряющему разность смещений концов толкателей (рис. 2б).

Область применения dilatометров с толкателями со стороны высоких температур ограничена свойствами материала для толкателя.

Первыми и наиболее распространенными стали dilatометры с толкателями, у которых передающая система выполнена из плавленого кварца. Обычно их используют до  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Их относительная точность тоже невысока, порядка  $1 \cdot 10^{-7}\text{ K}^{-1}$ , и значительно уступает различным бесконтактным, например, оптическим методам. Примеры реализации устройств с толкателями можно найти в [12–16]. Для работы при более высоких температурах передающую систему в dilatометрах с толкателем необходимо изготавливать из корунда (до  $2000\text{ K}$ ) или из графита (до  $3000\text{ K}$ ). Например, в [16] dilatометр с графитовыми нагревателями и толкателем из изотропного графита использовался для измерений в диапазоне температуры до  $2400\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Для измерения смещения края толкателя используются датчики различных типов. В настоящее время большое количество датчиков с различными уровнями чувствительности выпускается серийно. Тематика датчиков лежит за рамками настоящего обзора.

**Рентгеновские и оптические методы** – более точные и универсальные бесконтактные методы измерений.

**Рентгеновские методы** используют дифракцию рентгеновских лучей на кристаллической решетке. Такие методы не применимы:

– к некристаллическим/аморфным веществам;

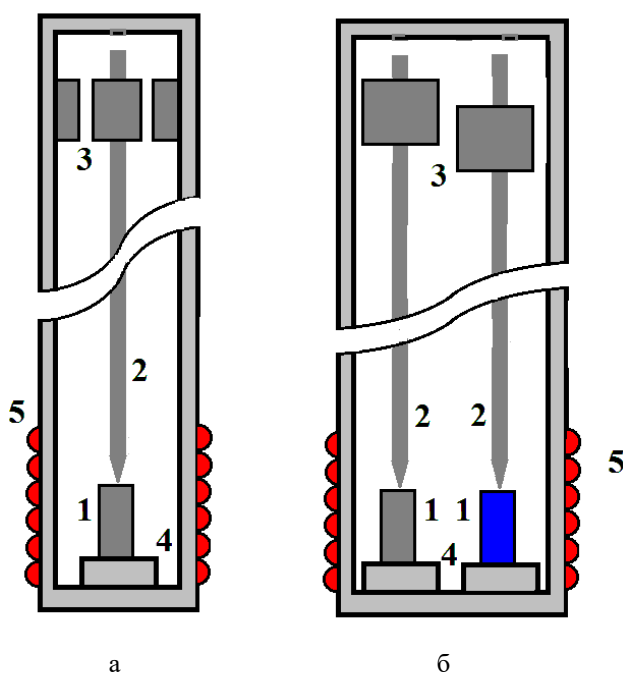


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным /  
The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 2. Общая схема dilatометра с толкателем: а – схема dilatометра с толкателем; б – схема относительного dilatометра с двумя толкателями, где 1 – исследуемый образец (в рис. 2б он же – образец сравнения), 2 – стержень толкателя, 3 – устройство измерения относительного смещения, 4 – держатель образца, 5 – печь-нагреватель

Fig. 2. Principal diagram of a dilatometer with a push-rod: а – diagram of a dilatometer with a push-rod; б – diagram of a relative dilatometer with two push-rods, where 1 is the test sample (in Fig. 2b it is also the comparison sample), 2 is the push-rod, 3 is the relative displacement measuring device, 4 is the sample holder, 5 is the heating furnace



– не применимы для измерений изменения размеров объектов в целом.

Получаемая из таких измерений информация локальна и, кроме того, не учитывает расширение за счет образования вакансий [2, 17]. В работах с применением рентгеновских методов СКО относительного удлинения составляет порядка  $1 \cdot 10^{-5}$ , а температуры 2–5 К. Примеры других работ, в которых использовалась рентгеновская дифракция, можно найти в [18–21]. Как разновидность рентгеновских методов можно рассматривать дифракцию электронов на кристаллической решетке [22]. Далее в работе данная группа методов не рассматривается в силу их специфичности и не универсальности.

**Оптические методы** существенно более распространены, их удобно разделить на **интерференционные** и **компараторные**.

**Интерференционные методы** различают по типу использованного интерферометра. В большинстве случаев установка строится по типу интерферометра Физо (Fizeau) (рис. 3).

Дилатометры, построенные по этой схеме, описаны в [23–26]. Достижимая точность определения ТКЛР в установках такого типа порядка  $0,5 \cdot 10^{-8} \text{ K}^{-1}$ . Естественным пределом возможности использования подобной установки в области высоких температур является температура плавления оптических элементов (строго говоря, температура размягчения, при которой оптические элементы начинают терять форму).

Для наиболее высокотемпературного оптического материала – сапфира с температурой плавления 2100 К – предел рабочих температур составляет около 1800 К [27].

Чувствительность, достигаемая в дилатометрах, использующих явление интерференции, фундаментально ограничена точностью, с которой можно определить сдвиг интерференционной картины. К настоящему времени наилучшая достигнутая чувствительность по сдвигу составляет  $2 \cdot 10^{-3}$  полосы интерференционной картины. Такой результат получен за счет оптимизированного алгоритма обработки изображения интерференционной картины [28].

В ряде работ Робертсона, Беннета [29, 30] для определения малых сдвигов применен анализ параметров поляризованного света. Такой подход исключает громоздкие вычисления.

Сдвиг интерференционной картины при этом преобразуется во вращение плоскости поляризации, которое детектируется с помощью анализаторов.

Такая методика была использована в работе Беннета [30] в NPL. Свет исходного источника разделяется призмой на два пучка, один из которых был направлен на полированную поверхность образца, а другой – на отражающее основание, на котором находился образец. Угловой отражатель позволял каждому лучу перед повторным объединением двух лучей пройти два прохода на соответствующее расстояние. Разность путей двух ортогонально линейно поляризованных лучей после их совмещения преобразовывалась в угол поворота поляризации результирующего луча. Таким образом, измерения удлинения сводится к измерениям параметров поляризации выходящего света.

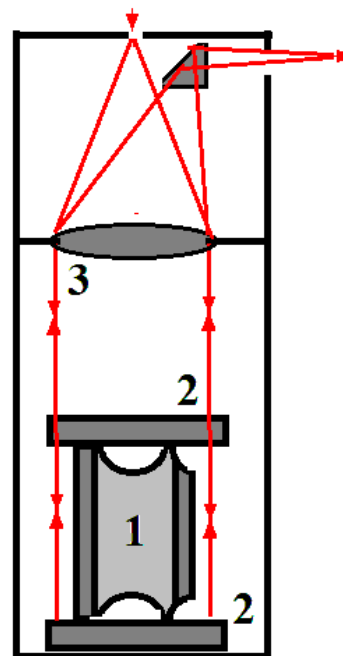


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным /  
The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 3. Схема интерферометра Физо: 1 – исследуемый образец; 2 – интерференционные пластины (область локализации интерференции – нижняя плоскость верхней пластины); 3 – оптическая система

Fig. 3. Fizeau interferometer diagram: 1 – sample under study; 2 – interference plates (interference localization region – lower plane of the upper plate); 3 – optical system

В статье Беннетта описаны измерения расширения в диапазоне температуры от 0 до 500 °С для различных материалов. Как свидетельство высокой точности этого метода, коэффициент расширения плавленого кремнезема (порядка  $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) может быть определен с погрешностью около 1 % в диапазоне температур 50 К для образца толщиной 50 мм. Этот метод, разработанный Беннеттом, включен (наряду с методом Физо) в стандарт ASTM E289–99<sup>1</sup>.

Примеры современных работ с применением интерферометрических методов при повышенных температурах приведены ниже.

Ойкава и соавторы [31] использовали модифицированный интерферометр Майкельсона для изучения расширения кварца до 700 °С. В частности, здесь используется двойной путь прохождения He-Ne лазерного луча, дважды отраженного от каждого зеркала. Образец длиной 10–15 мм и диаметром 4–7 мм с закругленными концами нагревали в печи при температуре 2 °С мин<sup>-1</sup>. Температуру измеряли с помощью термопары, расположенной рядом с образцом (система была предварительно откалибрована с помощью термопары, находящейся в контакте с фиктивным образцом). Разрешение составило 2 нм, точность – 20 нм.

Масуда и соавторы [32] оценили чувствительность в 6 нм (1/100 длины волны He-Ne лазера) для измерений расширения корунда до 727 °С. Их методика заключалась в формировании фигуры Лиссажу из сигналов от горизонтальных и вертикальных поляризованных лучей, которые изначально были ортогональны по фазе.

Для устранения любых незначительных изменений длины волны лазерного излучения, используемого для интерферометрии, Эскалона и Розы [33] предложили метод непрерывной волновой интерферометрии с частотной модуляцией (FMCW) для измерений теплового расширения. В дополнение к основному интерферометру для измерений расширения образца в этом методе также используется второй интерферометр, на пути которого нет образца, и, таким образом, он действует как эталонное устройство. Использование

интерферометрии при более высоких температурах приводит к многочисленным проблемам, включая воздействие излучаемого образцом яркого света и износ оптической отражающей поверхности со временем.

В [32] описана специальная технология импульсного нагрева. Трубчатые образцы нагревались импульсом электрического тока продолжительностью менее одной секунды. Температура контролировалась с помощью пирометра, а расширение по диаметру трубки регистрировалось с помощью модифицированного интерферометра Майкельсона. Лазерный луч отражался от противоположных сторон образца перед повторным объединением с эталонным лучом. При использовании этого метода были получены результаты термического расширения ниобия, молибдена и тантала выше 2 500 °С, а вольфрама – до 3 300 °С.

В работе [34] авторами предложен метод быстрых интерференционных измерений совместимый с импульсным нагревом.

**Компараторный и варианты методов на его основе** – наиболее перспективные методы. При компараторном методе положения торцов образца, находящегося в печи, фиксируются дистанционно оптическими методами. Измерительная установка при этом находится при нормальных климатических условиях. Примером может служить высокотемпературный дилатометр ВНИИМ [35], позволяющий проводить измерения ТКЛР в диапазоне температур от 1 000 до 3 000 К. В основу функционирования этого дилатометра положен метод измерений удлинения, идеологически близкий к классическим компараторным методам. Для измерений температуры применяется пирометр, а для измерений удлинения – оптико-электронная измерительная система из двух параллельно направленных оптических каналов наблюдения, каждый из которых состоит из объектива и устройства считывания изображения. Зарегистрированное измерительной системой смещение торцов образца (или меток на образце) пересчитывается в удлинение компьютерной системой в реальном времени. Расширенная неопределенность измерений ТКЛР на установке ВНИИМ составляет 0,5–0,8 % (в зависимости от температурного диапазона и от значений ТКЛР измеряемого образца).

<sup>1</sup> ASTM E289–99 Standard test method for linear thermal expansion of rigid solids with interferometry.

Тем не менее, большинство исследований ограничено по температуре величиной порядка 1 500–2 000 К [36, 37].

Методы измерений температуры при значениях выше 1 700 °С достаточно хорошо отработаны и стандартны. В существующих дилатометрах данного температурного диапазона измерений температуры производят бесконтактным способом с помощью оптических пирометров (в данной работе этот аспект высокотемпературной дилатометрии не рассматривается).

### **Факторы, ограничивающие возможности измерений при высоких температурах, и пути их преодоления**

Значительные трудности в области температур выше 600 °С связаны со свечением образцов. Как было отмечено выше, измерения температуры и удлинения в этой области температур возможны почти исключительно бесконтактными, преимущественно оптическими методами. Поэтому собственное свечение образца и окружающих его объектов представляет существенную трудность при проведении измерений, потому что и непосредственно наблюдателю-измерителю, и фотоприемникам крайне затруднительно выделить полезный сигнал на фоне паразитной засветки.

Преодоление этого ограничивающего фактора возможно различными путями. В принципе, было бы полезным использование источника света с более короткой длиной волны – синей или зеленой. Поскольку основное свечение нагретых тел лежит в красно-желтой области спектра, это бы позволило лучше выделять сигнал на фоне паразитного свечения. Но необходимо учитывать следующее обстоятельство: источник должен быть достаточно интенсивным, хорошо коллимируемым, со стабильной и точно известной длиной волны. В настоящее время из источников, существующих серийно, всем этим параметрам одновременно удовлетворяют только стабилизированные гелиевые лазеры с длиной волны 632,81 нм, поэтому предложенное выше решение пока нереализуемо.

Другим, также чисто оптическим способом улучшения отношения полезного сигнала

к фоновому было бы применение интерференционных фильтров. Ширина спектральной линии лазерного излучения мала. В случае лазера, длина волны которого стабилизирована до 5–6-го знаков, ширина линии лазера составит десятые-сотые доли ангстрема. При использовании интерференционного фильтра с шириной пропускания порядка 10 ангстрем возможно практически полное подавление паразитного излучения по сравнению с полезным сигналом. Такое решение применимо и было бы эффективным (а) в случае использования многоканального фотоприемника, регистрирующего изображение; (б) в случае простого приемника интенсивности и даже при визуальной регистрации.

Еще одно техническое решение, не являющееся чисто оптическим, заключается в применении модуляции интенсивности луча лазера, используемого для измерений. Достаточно простым и эффективным является использование механического прерывателя света (chopper). Такое решение электронной регистрации способно повысить отношение сигнал/шум в регистрирующей системе на несколько порядков (1–2 порядка). Необходимо при этом учитывать, что подобное техническое решение будет бесполезным в случае визуальной регистрации, а также потребует более сложной программной обработки сигнала при использовании многоканальных фотоприемников.

Высокотемпературные установки неизбежно представляют комплекс приборов и устройств, имеющих разную температуру, но расположенных достаточно компактно. Измерительные блоки могут испытывать влияние нагрева соседних узлов, что делает возможным труднопрогнозируемый уход параметров установки в целом. Это вызывает необходимость предусмотреть специальные методы калибровки, доступные непосредственно в ходе измерительного эксперимента.

В высокотемпературном дилатометре ВНИИМ для учета теплового расширения элементов измерительной системы под действием излучения печи внутри системы размещается репер. Репер представляет собой микрометрическую линейку, за которой расположен отключаемый источник подсветки. Изображение репера вводится в оптический канал при помощи



системы светоделителей. Переключение измерительной системы на измерения репера осуществляется без каких-либо механических движений – простым включением осветителя репера, изображение которого заранее (до включения освещения) совмещено с измерительной системой.

### Заключение

Изучение теплового расширения материалов при высоких температурах – актуальный раздел термомеханики. К настоящему времени уже в нескольких установках в мире достигнут верхний предел диапазона температур – около 3 000 °С и точность в измерениях ТКЛР – порядка долей процента. В то же время появились сообщения о том, что разрабатываются материалы, работающие при температурах до 5 000 °С. Очевидно, что возможности измерительных устройств должны соответствовать и желательно даже опережать развитие технологий.

В статье также рассмотрены технические приемы, которые могут обеспечить повышение точности измерений при высоких температурах. В целом, анализ свидетельствует, что существуют значительные возможности улучшения методик регистрации теплового расширения при измерениях ТКЛР в области экстремально высоких температур.

К сожалению, в научной литературе мало публикаций на близкие темы. Возможно, это

обусловлено специфическими областями применения подобных материалов. Данный обзор частично восполняет этот пробел.

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

**Conflict of interest:** The authors declare no conflict of interest.

**Вклад авторов:** Все авторы внесли вклад в концепцию и дизайн исследования. Компан Т. А. – создание рукописи, написание текста рукописи, формулировка выводов, редактирование рукописи; Кондратьев С. В. – работа с источниками литературы, создание визуальных материалов.

**Contribution of authors:** All authors contributed to the concept and design of the study. Kompan T. A. – creation of the manuscript, writing the text of the manuscript, formulation of conclusions, revision of the manuscript; Kondratyev S. V. – literature review, creation of visual materials.

**Финансирование:** Это исследование не получало финансовой поддержки в виде гранта от какой-либо организации государственного, коммерческого или некоммерческого сектора.

**Funding:** This research did not receive financial support in the form of a grant from any governmental, for-profit or non-profit organizations.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Tunable thermal expansion in functionalized 2D boron nitride: a first-principles investigation / Sk. M. Hossain [et al.] // Preprint. arXiv:2504.20443 [cond-mat.mtrl-sci]. Submitted on 29 April 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.20443>
2. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Статистическая физика : 2 издание, переработанное. М. : Наука, 1964. 568 с.
3. Handbuch der Physik. Bd. 1. Geschichte der Physik, Vorlesungstechnik / von E. Hoppe [et al.]. Berlin : J. Springer, 1926.
4. Новикова С. И. Тепловое расширение твердых тел. М. : Наука, 1974. 239 с.
5. Курбанов М. М. Тепловое расширение и изотермическая сжимаемость TLGATE2 // Неорганические материалы. 2005. Т. 41, № 12. С. 1449–1451.
6. Бодряков В. Ю. Корреляция температурных зависимостей теплового расширения и теплоемкости вплоть до точки плавления тантала // Теплофизика высоких температур. 2016. Т. 54, № 3. С. 336–342. <https://doi.org/10.7868/S0040364416030029>
7. Fischer J., Wendland M. On the history of key empirical intermolecular potentials // Fluid Phase Equilibria. 2023. V. 573. P. 113876. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2023.113876>
8. Negative thermal expansion ALLVAR alloys for telescopes / J. A. Monroe [et al.]. In: Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation III : Event SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, Austin, Texas, United States, 2018. Vol. 10706. <https://doi.org/10.1117/12.2314657>

9. *Kuzkin V. A.* Comment on “Negative thermal expansion in single-component systems with isotropic interactions” // The Journal of Physical Chemistry A. 2014. Vol. 118, № 41. P. 9793–9794.
10. Negative thermal expansion from 0.3 to 1050 Kelvin in  $\text{ZrW}_2\text{O}_8$  / *T. A. Mary* [et al.] // Science. 1996. Vol. 272, № 5258. P. 90–92. <https://doi.org/10.1126/science.272.5258.90>
11. Uniaxial negative thermal expansion in a weak-itinerant-ferromagnetic phase of  $\text{CoZr}_2\text{H}_{3.49}$  / *Y. Watanabe* [et al.] // Preprint. arXiv:2509.20765 [cond-mat.mtrl-sci]. Submitted on 25 September 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.20765>
12. Measurement of thermal expansion over a wide range of temperatures by a pushrod dilatometer / *D. Kim* [et al.] // Journal of the Korean Physical Society. 2020. Vol. 77, Iss. 6. P. 496–504. <https://doi.org/10.3938/jkps.77.496>
13. Thermal expansion coefficient of steels used in LWR vessels / *J. E. Daw* [et al.] // Journal of Nuclear Materials. 2008. Vol. 376, Iss. 2. P. 211–215. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2008.02.088>
14. *Fitzer E., Weisenburger S.* Cooperative measurement of the thermal expansion behavior of different materials up to 1000 °C by pushrod dilatometers // AIP Conference Proceedings. 1972. Vol. 3, Iss. 1. P. 25–35. <https://doi.org/10.1063/1.2948565>
15. *Iwashita N.* Temperature dependence of the coefficient of thermal expansion of different artificial graphites and the dimensional change during heat treatment of carbonized specimens // Tanso. 2019. № 289. P. 148–153. <https://doi.org/10.7209/tanso.2019.148>
16. *Iwashita N.* Development of high temperature property measurements for artificial graphite materials and their analysis // Tanso. 2019. № 288. P. 91–102. <https://doi.org/10.7209/tanso.2019.91>
17. *Boboqambarova M. A., Nazarov A. V.* Modeling changes in atomic structure around a vacancy with increasing temperature and calculation of temperature dependences of vacancy characteristics in bcc iron // Preprint. arXiv:2510.08877 [cond-mat.mtrl-sci]. Submitted on 10 October 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.08877>
18. Combined synchrotron X-ray diffraction, dilatometry and electrical resistivity in situ study of phase transformations in a  $\text{Ti}_2\text{AlNb}$  alloy / *V. A. Esin* [et al.] // Materials Characterization. 2020. Vol. 169. P. 110654. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110654>
19. In situ synchrotron X-ray diffraction and dilatometric study of austenite formation in a multi-component steel: Influence of initial microstructure and heating rate / *V. A. Esin* [et al.] // Acta Materialia. 2014. Vol. 80. P. 118–131. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.07.042>
20. In-situ synchrotron x-ray diffraction and thermal expansion of  $\text{TiB}_2$  up to ~3050 °C / *E. S. Converse* [et al.] // Journal of the European Ceramic Society. 2023. Vol. 43, Iss. 8. P. 3005–3012. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.01.050>
21. *Beynon O. T., Hashibon A.* Anharmonic effects in  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  and consequences on thermodynamic stability // Preprint. arXiv:2510.12526 [cond-mat.mtrl-sci]. Submitted on 14 October 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.12526>
22. Mapping temperature using transmission Kikuchi diffraction / *Y. C. Xin* [et al.] // Preprint. arXiv:2510.14175v1 [cond-mat.mes-hall] 16 Oct 2025. <https://arxiv.org/html/2510.14175v1>
23. *Ho C. Y., Taylor R. E.* Thermal expansion of solids. Materials Park, OH : ASM International, 1998. P. 293.
24. Thermophysical properties of matter – the TPRC data series. Volume 12. Thermal expansion metallic elements and alloys / *Y. S. Touloukian* [et al.]. New York : IFI-Plenum, 1975. 1442 p.
25. *Maglic K. D., Cezairliyanand A., Peletsky V. E.* Compendium of thermophysical property measurement methods: Volume 1 Survey of measurement techniques. New York : Springer, 1984. 806 p.
26. Interferometric dilatometer for thermal expansion coefficient determination in the 4–300 K range / *G. Bianchini* [et al.] // Measurement Science and Technology. 2006. Vol. 17, № 4. P. 689. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/4/013>
27. *Компан Т. А.* Государственный первичный эталон единицы ТКЛР твердых тел. В кн. : Российская метрологическая энциклопедия. СПб. : Лики России, 2001. С. 461–463.
28. *Компан Т. А., Коренев А. С., Лукин А. С.* Контроль погрешности и обеспечение достоверности результатов измерения фазового сдвига в интерференционном dilatометре // Измерительная техника. 2007. № 4. С. 18–22.
29. *Roberts R. B.* Absolute dilatometry using a polarization interferometer // Journal of Physics E: Scientific Instruments. 1981. Vol. 14, № 12. P. 1386–1388.
30. *Bennett S. J.* An absolute interferometric dilatometer // Journal of Physics E: Scientific Instruments. 1977. Vol. 10, № 5. P. 525. <https://doi.org/10.1088/0022-3735/10/5/030>
31. *Oikawa N., Maesono A., Tye R. P.* Thermal expansion measurements of quartz glass. In: Gaal P., Apostolescu D. Thermal conductivity 24, Thermal expansion 12. Lancaster : Technomic, 1999. P. 405–414.
32. *Masuda K., Erskine D., Anderson O. L.* Differential laser-interferometer for thermal expansion measurements // American Mineralogist. 2000. Vol. 85. P. 279–282.

33. Escalona R., Rosi C. Frequency modulated wave interferometry for thermal expansion measurements // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Guanajuato, Mexico, 18–22 September 1995 / edit: D. Malacara-Hernandez [et al.]. Guanajuato, Mexico : 1996. Vol. 2730. P. 414–417.
34. Müller A. P., Cezairliyan A. High-Speed interferometric techniques for thermal expansion measurements at high temperatures. In: Ho C. Y., Taylor R. E. Thermal Expansion of Solids. United States of America : ASM International, 1998. P. 245–242.
35. Measurement of the thermal expansion coefficient for ultra-high temperatures up to 3000 K / T. A. Kompan [et al.] / International Journal of Thermophysics. 2018. T. 39, № 3. P. 40. <https://doi.org/10.1007/s10765-017-2353-0>
36. Козловский Ю. М., Станкус С. В. Тепловое расширение окиси бериллия в интервале температур 20–1550 °C // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52, № 4. С. 563–567. <https://doi.org/10.7868/S0040364414030168>
37. Козловский Ю. М., Станкус С. В. Плотность и тепловое расширение диспрозия в интервале температур 110–1950 K // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 4. С. 521–528.

## REFERENCES

1. Hossain SkM, Kim D, Park J, Lee S-Ch, Bhattacharjee S. Thermal expansion in functionalized 2D boron nitride: a first-principles investigation. *Preprint*. arXiv:2504.20443 [cond-mat.mtrl-sci]. Submitted on 29 April 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.20443>
2. Landau LD, Livshits EM. Statistical physics : 2nd edition, revised. Moscow: Nauka; 1964. 568 p. (In Russ.).
3. Hoppe von E, Lambertz A, Mecke R et al. Handbuch der Physik. Bd. 1. Geschichte der Physik, Vorlesungstechnik. Berlin: J. Springer; 1926.
4. Novikova SI. Thermal expansion of solids. Moscow: Nauka; 1974. 239 p. (In Russ.).
5. Kurbanov MM. Thermal expansion and isothermal compressibility of TLGATE2. *Inorganic Materials*. 2005;41(12):1277–1279. (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/s10789-005-0300-0>
6. Bodryakov VY. Correlation between temperature dependences of thermal expansivity and heat capacity up to the melting point of tantalum. *High Temperature*. 2016;54(3):316–321. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0018151X16030020>
7. Fischer J, Wendland M. On the history of key empirical intermolecular potentials. *Fluid Phase Equilibria*. 2023;573:113876. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2023.113876>
8. Monroe JA, McAllister JS, Content DS, Zgarba J, Huerta Xr, Karaman I. Negative thermal expansion ALLVAR alloys for telescopes. In: *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation III* : Event SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, Austin, Texas, United States, 2018. <https://doi.org/10.1117/12.2314657>
9. Kuzkin VA. Comment on “Negative thermal expansion in single-component systems with isotropic interactions”. *The Journal of Physical Chemistry A*. 2014;118(41):9793–9794.
10. Mary TA, Evans JSO, Vogt T, Sleight AW. Negative thermal expansion from 0.3 to 1050 Kelvin in ZrW<sub>2</sub>O<sub>8</sub>. *Science*. 1996;272(5258):90–92. <https://doi.org/10.1126/science.272.5258.90>
11. Watanabe Y, Suzuki K, Katase T, Miura A, Yamashita A, Mizuguchi Y. Uniaxial negative thermalexpansion in a weak-itinerant-ferromagnetic phase of CoZr<sub>2</sub>H<sub>3.49</sub>. *Preprint*. arXiv:2509.20765 [cond-mat.mtrl-sci]. Submitted on 25 September 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.20765>
12. Kim D, Lee S, Lee S-H, Kwon S. Measurement of thermal expansion over a wide range of temperatures by a pushrod dilatometer. *Journal of the Korean Physical Society*. 2020;77:496–504. <https://doi.org/10.3938/jkps.77.496>
13. Daw JE, Rempe JL, Knudson DL, Crepeau JC. Thermal expansion coefficient of steels used in LWR vessels. *Journal of Nuclear Materials*. 2008;376(2):211–215. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2008.02.088>
14. Fitzer E, Weisenburger S. Cooperative measurement of the thermal expansion behavior of different materials up to 1000 °C by pushrod dilatometers. *AIP Conference Proceedings*. 1972;3(1):25–35. <https://doi.org/10.1063/1.2948565>
15. Iwashita N. Temperature dependence of the coefficient of thermal expansion of different artificial graphites and the dimensional change during heat treatment of carbonized specimens. *Tanso*. 2019;289:148–153. <https://doi.org/10.7209/tanso.2019.148>
16. Iwashita N. Development of high temperature property measurements for artificial graphite materials and their analysis. *Tanso*. 2019;288:91–102. <https://doi.org/10.7209/tanso.2019.91>
17. Boboqambarova MA, Nazarov AV. Modeling changes in atomic structure around a vacancy with increasing temperature and calculation of temperature dependences of vacancy characteristics in bcc iron. *Preprint*. arXiv:2510.08877 [cond-mat.mtrl-sci]. Submitted on 10 October 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.08877>
18. Esin VA, Mallick R, Dadé M, Denand B, Delfosse J, Sallot P. Combined synchrotron X-ray diffraction, dilatometry and electrical resistivity in situ study of phase transformations in a Ti<sub>2</sub>AlNb alloy. *Materials Characterization*. 2020;169:110654. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110654>

19. Esin VA, Denand B, Le Bihan Qu, Dehmas M, Teixeira J, Geandier G et al. In situ synchrotron X-ray diffraction and dilatometric study of austenite formation in a multi-component steel: Influence of initial microstructure and heating rate. *Acta Materialia*. 2014;80:118–131. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.07.042>
20. Converse ES, Thorpe F, Rivera J, Charalambous H, King G, Cahill JT et al. In-situ synchrotron x-ray diffraction and thermal expansion of TiB<sub>2</sub> up to ~3050 °C. *Journal of the European Ceramic Society*. 2023;43(8):3005–3012. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.01.050>
21. Beynon OT, Hashibon A. Anharmonic effects in Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> and consequences on thermodynamic stability. *Preprint*. arXiv:2510.12526 [cond-mat.mtrl-sci]. Submitted on 14 October 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.12526>
22. Xin YC, Ling XYi, Lodico J, O'Neill T, Regan BC, Mecklenburg M. Mapping temperature using transmission Kikuchi diffraction. *Preprint*. arXiv:2510.14175v1 [cond-mat.mes-hall] 16 October 2025. <https://arxiv.org/html/2510.14175v1>
23. Ho CY, Taylor RE. Thermal expansion of solids. Materials Park, OH: ASM International; 1998. P. 293.
24. Touloukian YS, Kirby RK, Taylor R, Desai PD. Thermophysical properties of matter – the TPRC data series. Vol. 12. Thermal expansion metallic elements and alloys. New York: IFI-Plenum; 1975. 1442 p.
25. Maglic KD, Cezairliyanand A, Peletsky VE. Compendium of thermophysical property measurement methods: Vol. 1 Survey of measurement techniques. New York: Springer; 1984. 806 p.
26. Bianchini G, Barucci M, Del Rosso T, Pasca E, Ventura G. Interferometric dilatometer for thermal expansion coefficient determination in the 4–300 K range. *Measurement Science and Technology*. 2006;17(4):689. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/4/013>
27. Kompan TA. The state primary standard of the TCLR unit of solids. In: *The Russian Metrological Encyclopedia*. Saint-Petersburg: Liki Rossii; 2001. P. 461–463. (In Russ.).
28. Kompan TA, Korenev AS, Lukin AY. Monitoring the accuracy and provision of reliability for results of measuring the phase shift in an interference dilatometer. *Measurement Techniques*. 2007;50(4):372–377.
29. Roberts RB. Absolute dilatometry using a polarization interferometer. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 1981;14(12):1386–1388.
30. Bennett SJ. An absolute interferometric dilatometer. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 1977;10(5):525. <https://doi.org/10.1088/0022-3735/10/5/030>
31. Oikawa N, Maesono A, Tye RP. Thermal expansion measurements of quartz glass. In: Gaal P, Apostolescu D. Thermal conductivity 24, Thermal expansion 12. Lancaster: Technomic; 1999. P. 405–414.
32. Masuda K, Erskine D, Anderson OL. Differential laser-interferometer for thermal expansion measurements. *American Mineralogist*. 2000;85:279–282.
33. Escalona R, Rosi C. Frequency modulated wave interferometry for thermal expansion measurements. In: Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Guanajuato, Mexico, 18–22 September 1995. Ed. D. Malacara-Hernandez [et al.]. Guanajuato: Mexico; 1996. Vol. 2730. P. 414–417.
34. Müller AP, Cezairliyan A. High-Speed interferometric techniques for thermal expansion measurements at high temperatures. In: Ho CY, Taylor RE. Thermal Expansion of Solids. United States of America : ASM International; 1998. P. 245–242.
35. Kompan TA, Kondratiev SV, Korenev AS, Puhov N. F., Inochkin FM, Kruglov SK et al. Measurement of the thermal expansion coefficient for ultra-high temperatures up to 3000 K. *International Journal of Thermophys.* 2018;39(3):40. <https://doi.org/10.1007/s10765-017-2353-0>
36. Kozlovskii YuM, Stankus SV. Thermal expansion of beryllium oxide in the temperature interval 20–1550 °C. *High Temperature*. 2014;52(4):536–540. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0040364414030168>
37. Kozlovskii YM, Stankus SV. The density and thermal expansion of dysprosium in the temperature range 110–1950 K. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2015;22(4):501–508. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Компан Татьяна Андреевна** – д-р техн. наук, главный научный сотрудник лаборатории государственных эталонов и научных исследований в области теплового расширения и комплексного термического анализа, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19  
e-mail: t.a.kompan@vniim.ru

**Кондратьев Сергей Валерьевич** – научный сотрудник лаборатории государственных эталонов и научных исследований в области теплового расширения и комплексного термического анализа, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19  
e-mail: s.v.kondratiev@vniim.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Tatiana A. Kompan** – Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Laboratory of State Standards and Scientific Research in the Field of Thermal Expansion and Complex Thermal Analysis, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology

19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia  
e-mail: t.a.kompan@vniim.ru

**Sergei V. Kondratiev** – Researcher of the Laboratory of State Standards and Scientific Research in the Field Of Thermal Expansion and Complex Thermal Analysis, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology

19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia  
e-mail: s.v.kondratiev@vniim.ru