

УДК: 621.039.743; 53.083.9; 539.3

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.3.09>*Оригинальная статья / Original paper*

Бесконтактное определение давления в емкостях с обедненным гексафторидом урана по механической реакции на тепловое воздействие

Я.О. Бобровский

АО «НИКИЭТ»,

107140 Россия, г. Москва, пл. Академика Доллежалея, д. 1, корп. 3

Реферат. На открытых площадках разделительных заводов хранятся емкости с обедненным гексафторидом урана (ОГФУ) в течение десятков лет. Во время хранения в них может возникнуть опасно высокое избыточное давление, которое способно привести к аварии при вскрытии. Давление целесообразно периодически контролировать для заблаговременного выявления потенциально опасных емкостей. При этом измерение давления традиционными манометрами может быть невозможно, что требует применения способов бесконтактного определения давления. Существующие способы бесконтактного определения давления малопригодны для контроля давления в емкостях с ОГФУ. Цель работы – описать принципиально новый способ бесконтактного определения давления применительно к контролю давления в емкостях с ОГФУ. Способ заключается в выявлении датчиками деформации и температуры реакции емкости на тепловое воздействие и в дальнейшем использовании результатов измерений при расчете давления. Приведена простая теоретическая зависимость, связывающая измеренные деформации и температуру с давлением посредством коэффициентов A и B . Исследованы вопросы определения коэффициентов A и B . Выполнена оценка точности определения давления в емкости с ОГФУ по изложенному способу. Минимально достижимая абсолютная погрешность определения давления с учетом оценки погрешностей A и B составила $\pm 1,2$ атм. Минимально достижимая абсолютная погрешность определения давления без учета оценки погрешностей A и B составила $\pm 0,4$ атм. Высокие погрешности объясняются высокой жесткостью емкостей с ОГФУ.

Ключевые слова: обращение с радиоактивными отходами, ядерная безопасность, обедненный гексафторид урана, бесконтактное определение давления, механика деформируемого твердого тела, напряженно-деформированное состояние оболочек, измерение деформации.

Для цитирования: Бобровский Я.О. Бесконтактное определение давления в емкостях с обедненным гексафторидом урана по механической реакции на тепловое воздействие. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2026;3:123–141. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.3.09>

Введение

Существует огромное множество предназначенных для определения давления текучих сред измерительных приборов (манометров), классификации которых приведены в [1]. Манометры по принципу действия могут быть подразделены на: жидкостные (чашечные, двухтрубные, кольцевые и т.д.); грузопоршневые (с простым поршнем, с дифференциальными поршнями, с поршневым мультипликатором давления и т.д.); деформационные (с трубчатой пружины, с мембраной, с сильфонным чувствительным элементом и т.д.); электрические (манганиновые, пьезоэлектрические, ионизационные и т.д.).

У всех упомянутых видов манометров есть общая характерная особенность – их измерительные преобразователи или другие составные части измерительного прибора находятся в непосредственном контакте со средой, давление которой измеряется. Это обстоятельство не позволяет использовать такие приборы при решении некоторых узкоспециализированных задач, которые характеризуются отсутствием возможности разгерметизации емкостей для установки приборов с целью измерения давления. К таким задачам можно отнести контроль давления в емкостях с обедненным гексафторидом урана (ОГФУ).

ОГФУ хранят десятилетиями на открытых площадках разделительных заводов в герметичных емкостях [2]. ОГФУ является сильным окислителем, в жидком состоянии он реагирует со многими органическими веществами, в газообразном и твердом состояниях бурно взаимодействует с водой, в том числе содержащейся в воздухе, с образованием уранилфторида (UO_2F_2) и фтористого водорода (HF), а при нагревании ОГФУ выделяются пары HF. Сам ОГФУ является радиоактивным веществом, что создает условия для протекания процессов радиолиза. Выделение газа от совокупности химических реакций и процесса радиолиза за десятки лет хранения ОГФУ может привести к появлению опасно высокого избыточного давления в емкости, способного привести к аварии в процессе вскрытия. С точки зрения безопасности давление целесообразно периодически контролировать для заблаговременного выявления емкостей, давление в которых приближается к опасным значениям. Однако срок эксплуатации емкостей с ОГФУ может составлять 80–100 лет. За такой продолжительный период времени предустановленные манометры или элементы конструкции, предназначенные для их установки, могут прийти в негодность, что предопределяет контроль давления традиционными средствами невозможным.

Таким образом, приобретает актуальность развитие способов бесконтактного определения давления для контроля давления в емкостях с ОГФУ. Способы бесконтактного определения давления характеризуются отсутствием контакта измерительных преобразователей со средой, давление которой измеряется. Для их использования не требуется разгерметизация емкости в случае отсутствия предустановленных приборов для измерения давления. В настоящее время известны несколько таких способов. Приведем некоторые из них.

В [3] описан ультразвуковой способ бесконтактного измерения давления гелия в тепловыделяющем элементе (ТВЭЛ), который реализуется в двух вариантах. Первый вариант основан на измерении изменения интенсивности ультразвуковой волны при прохождении через множество границ раздела фаз в ТВЭЛ, зависящего в конечном

итоге от давления газа. Второй вариант основан на зависимости коэффициента отражения звуковой волны от границы раздела оболочки твэла и гелия от давления газовой среды.

В [4] изложен ультразвуковой резонансный способ контроля давления гелия в твэле. Он заключается в возбуждении ультразвуковых колебаний широкого спектра в твэле и определении частот собственных колебаний изделия, по которым судят о давлении газа.

В [5, 6] представлен теплофизический (тепловой) метод контроля давления гелия в твэле. В процессе его реализации изделие локально нагревают и измеряют его температуру на некотором расстоянии от точки нагрева, изменяющуюся в том числе и за счет конвективного движения гелия под оболочкой. Результаты измерений сопоставляют с градуированной характеристикой, получаемой в экспериментальных исследованиях на макетах твэлов, с целью определения давления.

Применение вышеуказанных способов для определения давления в емкостях с ОГФУ осложнено, в основном, неизвестностью газового состава среды в емкости, большими габаритами и массой емкости, а также ее низкой транспортабельностью в совокупности со статичностью измерительных установок. Для контроля давления необходима измерительная система, обладающая высокой мобильностью. В основе такой системы может лежать определение давления по деформациям на поверхности емкости.

Одно из наиболее ранних известных упоминаний идеи об измерении деформации оболочки (в оригинале – трубопровода) с целью определения ее внутреннего давления встречается в [7]. При этом в основе измерения деформации лежит фиксация смещений точек трубопровода друг относительно друга. Однако в настоящее время широко распространены средства измерения деформации непосредственно в точках на поверхностях различных конструкций. К таким средствам можно отнести известные тензометрические преобразователи. Измерению деформации в точках на поверхности оболочки с целью бесконтактного определения давления посвящена работа [8]. Способ определения давления по указанному патенту включает в себя экспериментальные исследования оболочки (в оригинале – измерительного трубопровода) для получения градуированной зависимости деформации, температуры и давления. В дальнейшем эту зависимость используют при определении давления под оболочкой по показаниям датчиков деформации и температуры. Отметим, что помимо тензометрического способа измерения деформации, осложненного необходимостью наклеивания тензометрических преобразователей, можно использовать другие. В частности, можно выделить определение деформации методом спекл-интерферометрии и методом корреляции цифровых изображений [9].

Основным недостатком способа определения давления по [8] является необходимость иметь значение внутреннего избыточного давления p_1 в некоторый начальный момент времени τ_1 для расчета избыточного давления p_2 в последующий момент времени τ_2 по приращениям деформации $\Delta \varepsilon$ и температуры Δt за указанный интервал времени. От себя добавим, что в [8] избыточное давление p_1 равно нулю и соответствует моменту монтажа датчиков деформации до начала экспериментальных исследований. Указанный недостаток ограничивает применение описанного способа определения давления. В частности, с его помощью нельзя контролировать давление в емкостях с ОГФУ, уже находящихся на хранении. В настоящей работе подробно описан

новый способ бесконтактного определения давления, впервые представленный в [10] и развивающий идею, изложенную в [8], но исключающий ее основной недостаток.

Описываемый в настоящей работе способ бесконтактного определения давления основан на фиксации датчиками деформации и датчиками температуры реакции емкости на тепловое воздействие (на нагрев или охлаждение) и на дальнейшем использовании результатов измерений в расчете давления. При этом способ может быть осуществлен без принудительного нагрева или охлаждения за счет использования естественного суточного перепада температуры окружающей среды. Реализация способа включает в себя изменение температуры емкости на величину Δt в интервале времени от τ_1 до τ_2 и измерение соответствующего изменения линейной деформации $\Delta \varepsilon$ на ее поверхности, обусловленного термическим расширением или сжатием емкости, а также механическими деформациями за счет изменения давления среды в емкости при изменении температуры. Дополнительно в интервале времени от τ_1 до τ_2 фиксируется изменение атмосферного давления $\Delta p_{\text{атм}}$. Измеренные значения $\Delta \varepsilon$, Δt и $\Delta p_{\text{атм}}$ используются совместно с текущими значениями температуры емкости t и атмосферного давления $p_{\text{атм}}$ в произвольный момент времени τ для определения текущего избыточного давления в емкости p . При этом в расчете используется зависимость вида

$$p = f(\Delta \varepsilon, \Delta t, t, \Delta p_{\text{атм}}, p_{\text{атм}}, A, B). \quad (1)$$

Здесь A и B – коэффициенты, зависящие от геометрии оболочки, физико-механических свойств ее материала, выбора точки и направления измерения деформации. Значения коэффициентов A и B будут раскрыты в дальнейшем.

Цель настоящей работы – описать новый способ бесконтактного определения давления применительно к контролю давления в емкостях с ОГФУ. Для удобства изложения упомянутый способ бесконтактного определения давления будем называть тепломеханическим.

Объект исследования

В настоящей работе тепломеханический способ бесконтактного определения давления будет рассматриваться применительно к контролю давления в погружных емкостях с ОГФУ объемом $2,5 \text{ м}^3$. Такие емкости наиболее широко используются на разделительных производствах, их описание приведено в [11]. Толщина емкости h – 8 мм. Примем, что при температуре 293 К модуль упругости первого рода материала емкости E равен 210 ГПа, коэффициент линейного температурного расширения α – $12 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, а коэффициент Пуассона μ – 0,3.

Поскольку механические свойства ОГФУ не известны, рассматриваться будут только деформации емкости выше уровня заполнения – на верхнем эллипсоидном днище, где влияние ОГФУ на деформации оболочки емкости ожидается незначительным. На рисунке 1 представлен эскиз исследуемой емкости с ОГФУ.

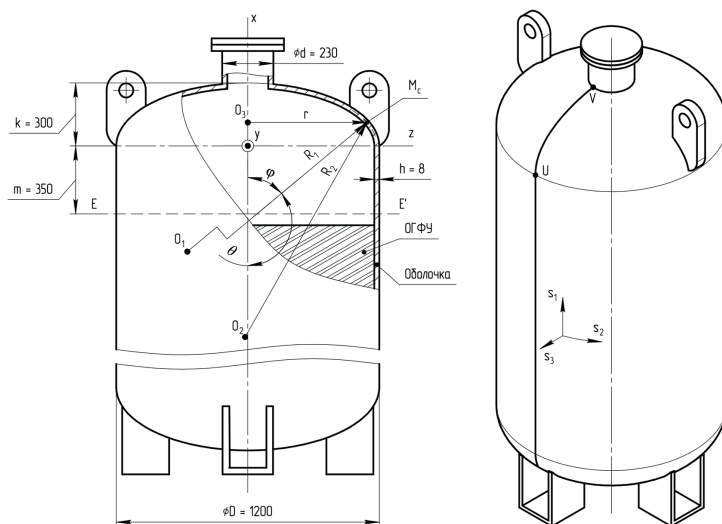


Рис. 1. Геометрические параметры погружной емкости с ОГФУ объемом 2,5 м³

Основополагающее уравнение

В связи с высокой жесткостью емкости с ОГФУ возникновение в ней напряжений, превышающих предел пропорциональности, не ожидается. Температура эксплуатации емкостей с ОГФУ не выходит за диапазон температур от -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$, где коэффициент линейного температурного расширения меняется слабо с изменением температуры для большинства сталей. Таким образом, емкость можно считать линейно-упругим телом, ее температурные деформации пропорциональными температуре, поэтому дифференциальные уравнения механики деформирования емкости будут линейными. Это значит, что линейная деформация на поверхности емкости в некоторой точке M связана с ее внутренним избыточным давлением и температурой линейно. Отсюда вытекает равенство, связывающее соответствующие приращения деформации $\Delta\varepsilon$, температуры Δt и давления Δp посредством некоторых коэффициентов A и B :

$$\Delta p = A\Delta\varepsilon + B\Delta t. \quad (2)$$

Положим, что емкость в процессе деформации изменяет свой объем незначительно, выделение газа внутри нее отсутствует или очень медленное, благодаря чему плотность газообразной среды ρ можно считать постоянной: $\rho \approx \text{const}$. Представляя избыточное давление p в виде разности абсолютного давления в емкости $p_{\text{абс}}$ и атмосферного давления $p_{\text{атм}}$, принимая справедливым уравнение идеального газа, из (2) можно получить

$$\rho R_{\text{инд}} - \frac{\Delta p_{\text{атм}}}{\Delta t} = A \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta t} + B. \quad (3)$$

Здесь $R_{\text{инд}}$ – индивидуальная газовая постоянная газообразной среды в емкости. Умножая (3) на температуру t в произвольный момент времени и вычитая соответ-

ствующее атмосферное давление $p_{\text{атм}}$, получаем зависимость для вычисления избыточного давления p :

$$p = \left(A\gamma + B + \frac{\Delta p_{\text{атм}}}{\Delta t} \right) t - p_{\text{атм}}, \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{d\varepsilon}{dt} \approx \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta t}, \quad (5)$$

где γ – чувствительность деформации емкости к изменению температуры в точке M .

Уравнение (4) выражает зависимость (1) и является основополагающим уравнением тепломеханического способа бесконтактного определения давления.

Определение коэффициентов A и B

Один из основных вопросов практического использования тепломеханического способа определения давления – нахождение коэффициентов A и B . Определить коэффициенты A и B можно расчетным путем (аналитически или численно) либо экспериментальным.

Аналитическое определение коэффициентов A и B включает в себя получение аналитического решения задачи о нахождении приращения деформации $\Delta\varepsilon$, возникающего при приращении нагрузки на $\{\Delta p, \Delta t\}$. Решение задачи приводится к виду (2) с целью выделения искоемых коэффициентов.

Численное определение коэффициентов A и B включает в себя получение численного решения задачи о нахождении приращения $\Delta\varepsilon^{(1)}$, возникающего при изменении нагрузки на $\{\Delta p^{(1)}, \Delta t^{(1)}\}$, а также численное определение приращения $\Delta\varepsilon^{(2)}$, возникающего при изменении нагрузки на вектор $\{\Delta p^{(2)}, \Delta t^{(2)}\}$, отличный от $\{\Delta p^{(1)}, \Delta t^{(1)}\}$. При этом коэффициенты A и B определяют путем решения системы линейных алгебраических уравнений (6).

$$\begin{pmatrix} \Delta p^{(1)} \\ \Delta p^{(2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta\varepsilon^{(1)} & \Delta t^{(1)} \\ \Delta\varepsilon^{(2)} & \Delta t^{(2)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Экспериментальное определение коэффициентов A и B включает в себя измерение приращений деформации $\Delta\varepsilon^{(1)}$ и $\Delta\varepsilon^{(2)}$ в опытах по нагружению емкости нагрузками $\{\Delta p^{(1)}, \Delta t^{(1)}\}$ и $\{\Delta p^{(2)}, \Delta t^{(2)}\}$. Искомые коэффициенты определяют из (6).

В соответствии с рис. 1 для осесимметричной емкости с ОГФУ введем следующие обозначения: s_1, s_2 и s_3 – меридиональное, окружное и нормальное направления; M_c – проекция точки M на срединную поверхность оболочки; R_1 – главный радиус кривизны оболочки в точке M_c в плоскости, проходящей через ось оболочки; R_2 – второй главный радиус кривизны; r – радиус окружности, получаемой сечением срединной поверхности плоскостью, перпендикулярной оси оболочки; θ и φ – углы между s_3 и осью оболочки.

Задача о нагружении осесимметричной замкнутой безмоментной оболочки внутренним давлением и температурой решена в [12] в аналитическом виде. Используя известное решение, приращения линейных деформаций в меридиональном $\Delta\varepsilon_1$ и окружном $\Delta\varepsilon_2$ направлениях в точке M можно связать с вектором $\{\Delta p, \Delta t\}$ следующим образом:

$$\Delta p = A_1 \Delta\varepsilon_1 + B_1 \Delta t, \quad (7)$$

$$\Delta p = A_2 \Delta\varepsilon_2 + B_2 \Delta t, \quad (8)$$

$$A_1 = \frac{E h}{\frac{r}{2 \sin(\theta)} - \mu R_2 \left(1 - \frac{1}{R_1} \frac{r}{2 \sin(\theta)} \right)}, \quad (9)$$

$$A_2 = \frac{E h}{R_2 \left(1 - \frac{1}{R_1} \frac{r}{2 \sin(\theta)} \right) - \mu \frac{r}{2 \sin(\theta)}}, \quad (10)$$

$$B_1 = -a A_1, \quad (11)$$

$$B_2 = -a A_2. \quad (12)$$

Здесь коэффициенты A_1 , B_1 и A_2 , B_2 найдены аналитически для меридионального и окружного направлений соответственно с использованием безмоментной теории оболочек, приводящей к существенным погрешностям при наличии значительных по величине погонных моментов. Для нахождения уточненных значений необходимо воспользоваться уравнениями моментной теории оболочек. Однако интегрирование этих уравнений в аналитическом виде для эллипсоидного днища емкости с ОГФУ затруднительно ввиду сложной геометрии. Задача о нахождении коэффициентов A и B с учетом отклонения деформированного состояния от безмоментного существенно упрощается при использовании описанного ранее численного метода, позволяющего определить искомые коэффициенты в общем случае.

В настоящей работе с использованием программного комплекса (ПК) *Ansys* [13] коэффициенты A и B численно определялись для точек поверхностной кривой эллипсоидного днища UV , находящейся в плоскости Oxy и показанной на рис. 1. Исследовалась область UV , соответствующая координатам y в диапазоне значений от 125 до 575 мм. Поскольку предмет исследования – кривая UV , геометрию расчетной модели достаточно ограничить областью высотой l . Окрестность стыка эллипсоидного днища и цилиндрической оболочки, радиус серединной поверхности которой обозначим через R , является областью резкого изменения геометрии, в которой возможны скачки деформации. Для их учета в расчетной модели предусмотрен цилиндрический участок длиной $m \approx 2 l_{кр}$, где $l_{кр}$ – длина зоны влияния краевого эффекта для цилиндрической оболочки, оцениваемая при практических расчетах по формуле [12]:

$$l_{кр} = \frac{\pi}{\sqrt[4]{3(1-\mu^2)}} \sqrt{Rh}. \quad (13)$$

В сечении модели $E - E'$ точкам оболочки запрещались линейные и угловые перемещения, за исключением радиальных перемещений. Радиальное перемещение центра точек срединной поверхности оболочки в сечении $E - E'$ не допускалось. Принималось, что все точки емкости имеют одинаковую температуру. Расчет выполнялся с использованием конечно-элементной (КЭ) модели, состоящей преимущественно из оболочечных 2D-элементов. Характерный размер КЭ обозначим q .

Учитывая, что емкость изотермическая, а крепление расчетной модели не стесняет температурного расширения, процесс определения A и B можно упростить. С использованием нагружения $\{\Delta p^{(1)} = 2\,000\,000\text{ Па}, \Delta t^{(1)} = 0\text{ К}\}$ и с применением первого уравнения системы (6) по численной методике определялись коэффициенты A . Температурное расширение не вызывает внутренних сил, и линейные деформации при действии исключительно температуры равны $\alpha \Delta t$. Поэтому с учетом (2) коэффициенты B для меридионального и окружного направлений измерения деформации могут быть вычислены по (11) и (12).

Согласно [14], достоверность численных расчетов обеспечивается геометрической достоверностью, физической достоверностью, верификацией и валидацией ПК, верификацией и валидацией расчетной модели, проведением количественной оценки неопределенностей. Геометрическая достоверность в рамках данной работы обеспечивается в пределах опубликованных в [11] данных о геометрии емкостей с ОГФУ. Физическая достоверность обеспечивается в рамках принятых свойств материала емкости приложением нагрузки в соответствии с реальными процессами, а также учетом влияния геометрии на поля деформации при упрощении расчетной модели. Использованный для расчетов ПК *Ansys* верифицирован в системе Российской академии архитектуры и строительных наук [15, 16]. Поскольку в верификационных тестах использовались в том числе экспериментальные данные, *Ansys* является верифицированным и валидированным для расчетов ПК. Верификация расчетной модели представляла из себя исследование сеточной сходимости невязки Res , вычисляемой при сетке с характерным размером КЭ, равным q , из уравнения

$$Res(q) = \Delta p^{(1)} - A^{(q)} \Delta \varepsilon^{(1)(q/2)} - B^{(q)} \Delta t^{(1)}. \quad (14)$$

Здесь $A^{(q)}$ и $B^{(q)}$ – коэффициенты A и B , рассчитанные из (6), (11), (12) при сетке с характерным размером КЭ, равным q ; $\Delta \varepsilon^{(1)(q/2)}$ – приращение линейной деформации $\Delta \varepsilon^{(1)}$, рассчитанное в ПК *Ansys* при сетке с характерным размером КЭ, равным $q/2$. Валидация расчетной модели осуществлялась качественным сравнением характера распределения эквивалентных напряжений по Мизесу на кривой UV при нагрузке $\{\Delta p^{(1)}, \Delta t^{(1)}\}$ с графиками безразмерных интенсивностей напряжений в эллипсоидной оболочке, приведенными в [17]. Количественная оценка неопределенностей выражена в исследовании неустранимой погрешности расчета коэффициентов A и B .

Оценка неустранимой погрешности расчета коэффициентов A и B емкости с ОГФУ

Рассчитанные коэффициенты A и B включают в себя устранимую погрешность (вычислительную погрешность и погрешность метода) и неустранимую погрешность.

Сосредоточимся на оценке неустранимой погрешности, обусловленной неточностью исходных данных, пренебрегая имеющейся устранимой погрешностью.

Абсолютная погрешность величины f , зависящей от параметров $x_1, x_2, \dots, x_n$, имеющих абсолютные погрешности $\delta x_1, \delta x_2, \dots, \delta x_n$, может быть оценена по известной формуле

$$|\delta f| = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \delta x_i \right)^2}. \quad (15)$$

Относительная погрешность определяется выражением

$$Err = \left| \frac{\delta f}{f} \right| \cdot 100\%. \quad (16)$$

Расчетные коэффициенты A и B являются преимущественно функциями параметров, определяющих геометрию (D, k, h на рис. 1) и физико-механические свойства (E, μ, α) оболочки. Положим, что для каждой точки на поверхности оболочки справедливо

$$A = A(D, k, h, E, \mu, \alpha), \quad (17)$$

$$B = B(D, k, h, E, \mu, \alpha). \quad (18)$$

Частную производную параметра f по параметру x_i в точке $\{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$ можно вычислить по известному приближенному соотношению

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} \approx \frac{f(x_1, \dots, x_i + \Delta x_i, \dots, x_n) - f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)}{\Delta x_i}. \quad (19)$$

Формула (19) при $\Delta x_i = \delta x_i$ использовалась для оценки частных производных A и B , определяемых выражениями (17) и (18). При этом для вычисления значений $f(x_1, x_2, \dots, x_i + \Delta x_i, \dots, x_n)$ осуществлялось изменение соответствующих параметров расчетной модели в ПК *Ansys*. Подставляя в (15) значения частных производных A и B вместе со значениями абсолютных погрешностей параметров их определяющих, можно определить неустранимые абсолютные погрешности δA и δB расчета коэффициентов A и B .

Пусть линейные размеры D и k емкости соответствуют «очень грубому» классу точности, устанавливаемому в [18] для изделий, изготавливаемых формообразованием из листового материала: $\delta D = \pm 6$ мм; $\delta k = \pm 2,5$ мм.

Толщина емкости h существенно влияет на жесткость емкости (цилиндрическая жесткость оболочки пропорциональна h^3). Поэтому с целью уменьшения неустранимой погрешности расчета A и B на практике целесообразно использовать не номинальный размер h , а его измеряемое значение. В этом случае неустранимая погрешность складывается не из поля допуска h , устанавливаемого государственным стандартом на листовой прокат [19], а из погрешности измерения толщины, которую можно определить, в частности, ультразвуковым способом. В работе [20] упоминается ультразвуковой толщиномер с основной погрешностью $\pm (0,03 + 0,0015 h)$ мм. С учетом

этого принимаем $\delta h = \pm 0,05$ мм, а измеренное значение h будем считать равным номинальному значению 8 мм.

В работах [21, 22] изложены методики определения механических свойств материалов и выполнена оценка относительных погрешностей их применения, которые составили 1,4% для E и 0,8% для μ . В работе [23] опубликованы результаты определения коэффициентов α изотопов железа, абсолютная погрешность измерений составила $\pm (0,01 \dots 0,13) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. С учетом этого принимаем $\delta E = \pm 3 \text{ ГПа}$, $\delta \mu = \pm 0,0025$, $\delta \alpha = \pm 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Оценка точности определения давления в емкости с ОГФУ по тепломеханическому способу

Обозначим δp – абсолютная погрешность определяемого избыточного давления. $\delta(\Delta \epsilon)$, $\delta(\Delta t)$, $\delta(\Delta p_{\text{атм}})$ – абсолютные погрешности измеряемых в процессе определения давления изменений деформации, температуры емкости и атмосферного давления в интервале времени от τ_1 до τ_2 , а δt , $\delta p_{\text{атм}}$ – абсолютные погрешности текущих температуры емкости и атмосферного давления. Значения δp рассчитывались из (15) с учетом (1), (4) и (5) при значениях параметров, определяющих p , и их погрешностей, соответствующих табл. 1.

Значения вектора $\{\Delta \epsilon, t, \Delta t, p_{\text{атм}}, \Delta p_{\text{атм}}\}$ назначены с учетом малости линейных деформаций, значений температуры и давления при нормальных условиях, данных ФГБУ «Гидрометцентр России» [24] о суточной динамике температуры и атмосферного давления в Иркутской области, в Красноярском крае, в Свердловской и Томской областях, где расположены разделительные заводы России (считается, что тепломеханический способ реализуется за счет естественного суточного перепада температуры).

Таблица 1

Значения параметров при расчете абсолютной погрешности давления

Параметр	Вариант расчета 1	Вариант расчета 2
$\Delta \epsilon$	0	0
$t, \text{ K}$	293	293
$\Delta t, \text{ K}$	10	10
$p_{\text{атм}}, \text{ Па}$	101 300	101 300
$\Delta p_{\text{атм}}, \text{ Па}$	1000	1000
$A, \text{ Па}$	По рис. 4	По рис. 4
$B, \text{ Па/К}$	По рис. 5	По рис. 5
$\delta(\Delta \epsilon)$	$\pm 1 \cdot 10^{-6}$	$\pm 1 \cdot 10^{-6}$
$\delta t, \text{ K}$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$
$\delta(\Delta t), \text{ K}$	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$
$\delta p_{\text{атм}}, \text{ Па}$	± 100	± 100
$\delta(\Delta p_{\text{атм}}), \text{ Па}$	± 200	± 200
$\delta A, \text{ Па}$	По рис. 6	0
$\delta B, \text{ Па/К}$	По рис. 6	0

Вследствие высокой жесткости линейные деформации емкости являются малыми величинами, для регистрации которых необходимы высокоточные средства измерения деформации. Представленный в [25] датчик деформации показывает, что в настоящее время уровень техники позволяет измерять линейные деформации порядка 10^{-6} . С учетом этого было принято значение $\delta(\Delta \epsilon)$.

Результаты верификации и валидации численных расчетов

В рамках верификации численных расчетов определены и представлены в табл. 2 $|\max(Res)|$ и $\langle |Res| \rangle$ – максимальное значение модуля Res и среднее значение модуля Res на интервале значений y от 125 до 575 мм. На рисунке 2 представлен график зависимости невязок Res от y при характерном размере КЭ модели $q = 6$ мм.

Таблица 2

Значения невязок

Характерный размер КЭ q , мм	Меридиональное направление измерения деформации $\Delta \epsilon_1$		Окружное направление измерения деформации $\Delta \epsilon_2$	
	$ \max(Res) $, Па	$\langle Res \rangle$, Па	$ \max(Res) $, Па	$\langle Res \rangle$, Па
48	388 798	41 902	691 772	109 401
24	157 891	11 634	195 361	26 999
12	23 648	4051	95 514	8 344
6	6 203	1007	35 525	1 550

По таблице 2 можно сделать вывод, что $\langle |Res| \rangle$ при $q = 6$ мм составляет не более 0,1% от значения давления $\Delta p^{(1)} = 2\,000\,000$ Па, при котором вычислялась Res по (14). $|\max(Res)|$ составляет не более 2% от $\Delta p^{(1)}$. По графику на рис. 2 можно наблюдать скачки Res для окружного направления измерения деформации при $y \approx 450$ мм, объясняемые наличием нерастянутого в окружном направлении слоя оболочки, где $\Delta \epsilon_2 = 0$. Близкие к нулю значения $\Delta \epsilon_2$ приводят к значительному увеличению влияния ошибок вычисления на конечный результат.

С учетом указанного по табл. 2 и рис. 2 можно сделать вывод, что при $q = 6$ мм достигается достаточная в рамках работы точность решения поставленной задачи. Все приводимые ниже результаты численных расчетов получены при $q = 6$ мм.

В рамках валидации численных расчетов определены и представлены на рис. 3 эквивалентные напряжения по Мизесу в эллипсоидном днище емкости с ОГФУ. Сравнивая полученные величины с безразмерными интенсивностями напряжений, рассчитанными в [17] для плавающего крепления днища, которое по сути достаточно близко

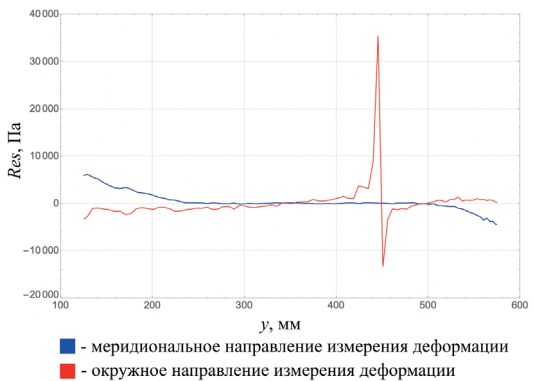
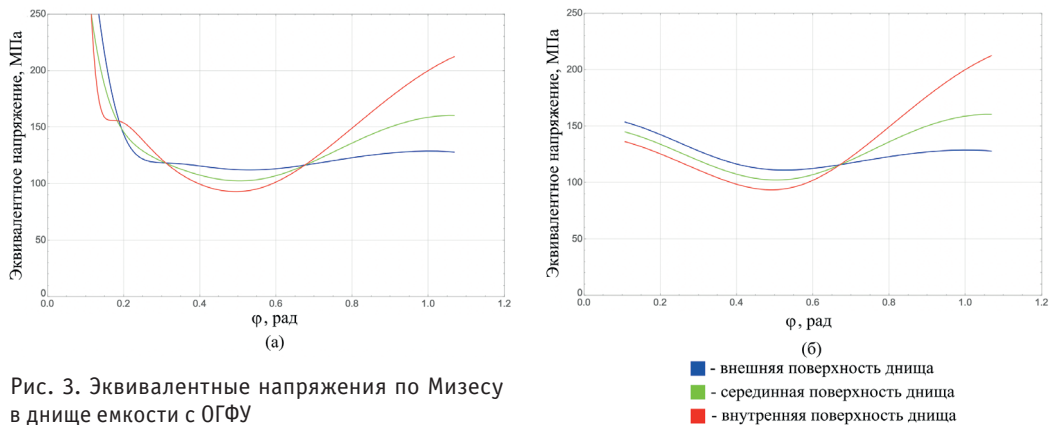


Рис. 2. Значения невязок Res при $q = 6$ мм

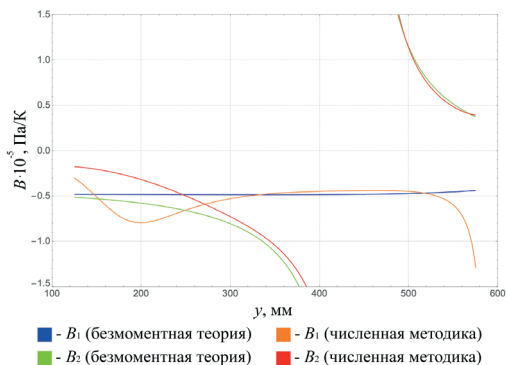
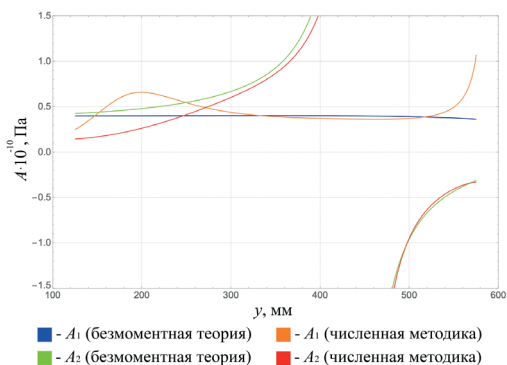
к креплению, использованному в настоящей работе, можно заключить, что при $\varphi > 0,4$ результаты качественно совпадают. Качественное отличие результатов при $\varphi < 0,4$ объясняется влиянием патрубка диаметром d (см. рис. 1). Исключение патрубка и расчет модели с замкнутым эллипсоидным днищем приводит к результатам расчета напряжений, показанным на рис. 3б и находящимися в качественном соответствии с работой [17].



Результаты расчета коэффициентов A и B

На рисунках 4, 5 показаны значения коэффициентов A и B для меридионального и окружного направлений, рассчитанных аналитически по безмоментной теории оболочек и по численной методике.

Коэффициенты A и B , рассчитанные по двум подходам, имеют существенные отличия. Это объясняется тем, что расчет в ПК *Ansys* учитывает достаточно большое отклонение деформированного состояния от безмоментного. Таким образом, при вычислении A и B эллипсоидного днища нельзя пренебрегать погонными моментами, вносящими существенный вклад в деформированное состояние. В связи с этим приводимые в дальнейшем результаты вычислений основаны на результатах численных расчетов в ПК *Ansys*.



Значения относительных неустранимых погрешностей A и B в зависимости от координаты y приведены на рис. 6.

Результаты оценки точности определения давления в емкости с ОГФУ по тепломеханическому способу

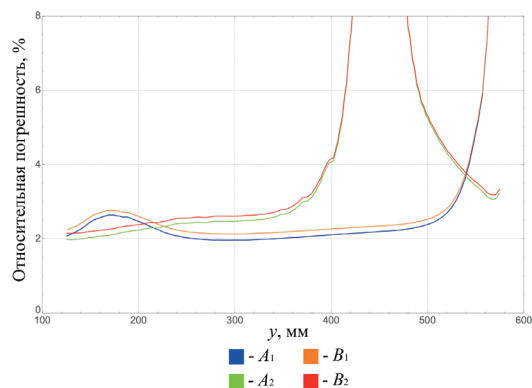


Рис. 6. Относительная неустранимая погрешность A и B

На рисунке 7 показаны результаты расчета модуля абсолютной погрешности определения избыточного давления $|\delta p|$ в емкости с ОГФУ по первому и второму вариантам в зависимости от координаты и направления измерения линейной деформации.

С учетом графиков на рис. 7 можно сделать следующие наблюдения и выводы.

1. Расчет δp по варианту 1 показал, что с учетом погрешностей всех параметров, определяющих значение давления по (1), наименьшее достижимое значение δp составляет порядка $\pm 1,2$ атм. Расчет δp по варианту 2 показал, что устранение погрешностей определения A и B снижает δp более чем в два раза. Минимальное значение абсолютной погрешности определения избыточного давления становится равным порядка $\pm 0,4$ атм.

2. Низкая точность тепломеханического способа определения давления применительно к контролю давления в емкостях с ОГФУ объясняется их высокой жесткостью, приводящей к большим по модулю значениям A и B . Высокие значения A и B увеличивают влияние погрешностей параметров $\Delta \varepsilon$, Δt и t на δp , а также приводят к высоким абсолютным значениям δA и δB , существенно увеличивающим δp .

3. Погрешность δp сильно зависит от координаты измерения $\Delta \varepsilon$.

4. Согласно [26], при избыточном давлении более 70 кПа на оборудование распространяются особые требования безопасности, поэтому давление $p_{оп} = 70$ кПа можно считать опасным. Расчет δp по варианту 1 показал высокое значение δp , предопределяющее неприменимость тепломеханического способа определения давления для контроля давления в емкостях с ОГФУ. Однако расчет по варианту 2 показал значение δp , допускающее применение указанного способа для простой индикации опасного состояния по следующей методике. Производятся несколько последовательных замеров избыточного давления p , вычисляется его математическое ожидание $\langle p \rangle$, если $\langle p \rangle + |\delta p| > p_{оп}$, емкость признается потенциально опасной.

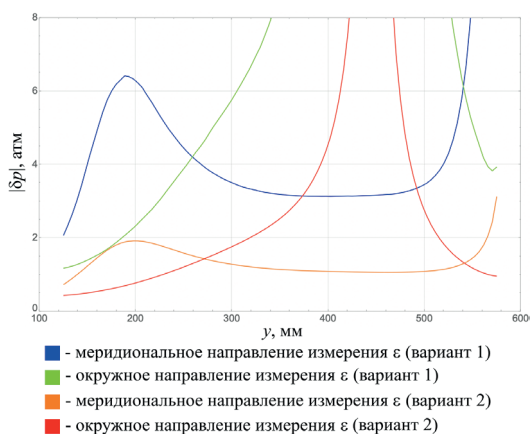


Рис. 7. Модуль абсолютной погрешности определения давления

5. Для применения тепломеханического способа определения давления для индикации опасного состояния необходимо принимать меры по снижению погрешностей A и B . Такими мерами могут служить экспериментальное определение A и B для каждой емкости перед вводом в эксплуатацию или замер геометрических параметров каждой емкости для уточнения их A и B расчетным путем.

6. Снижение δp при контроле давления в емкостях с ОГФУ ниже $\pm 0,4$ атм возможно путем совершенствования средств измерений деформации, температуры и атмосферного давления, а также увеличением Δt в процессе реализации тепломеханического способа с целью увеличения механической реакции емкости на тепловое воздействие, приводящему к упрощению регистрации деформации.

Заключение

Подробно описан принципиально новый тепломеханический способ бесконтактного определения давления применительно к контролю давления в емкостях с ОГФУ. Изложены теоретические основы способа. Приведена простая теоретическая зависимость, связывающая деформации, температуру и давление через коэффициенты A и B . Изложены способы, позволяющие определить эти коэффициенты.

Рассчитаны коэффициенты A и B для меридионального и окружного направлений измерения линейных деформаций эллипсоидного днища погружной емкости с ОГФУ объемом $2,5 \text{ м}^3$. Выполнена оценка неустранимой погрешности определения A и B . Выполнена оценка точности определения давления в емкости с ОГФУ с использованием изложенного способа. Наименьшая абсолютная погрешность определения давления с учетом и без учета погрешностей A и B составила порядка $\pm 1,2$ и $\pm 0,4$ атм соответственно. Применение тепломеханического способа возможно для определения наличия опасного состояния в емкости с ОГФУ по описанной в работе методике в случае принятия мер по снижению погрешностей определения A и B . Полученная низкая точность определения давления объясняется высокой жесткостью емкостей с ОГФУ. При измерении давления в более податливых конструкциях ожидается повышение точности при применении тепломеханического способа определения давления.

Литература

1. Гонек Н.Ф. Манометры. Л.: Машиностроение, 1979, 176 с.
2. Муратов О.Э. Проблемы обращения с обедненным гексафторидом урана (обзор). *Теоретическая и прикладная экология*. 2020;4:13–21. DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-4-013-021>
3. Решетников Ф.Г., Бибилашвили Ю.К., Головин И.С. и др. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. В 2 кн. Кн. 2. М.: Энергоатомиздат, 1995, 336 с. ISBN 5-283-03615-4.
4. Томшина А.А., Стелюк А.Ю., Лесин В.В. и др. Методика ультразвукового контроля давления гелия под оболочкой твэл (УЗКД). *Вопросы атомной науки и техники. Серия: материаловедение и новые материалы*. 2019;3:78–87. EDN: <https://elibrary.ru/ehppfz>
5. Пастушин В.В., Новиков А.Ю., Зеленчук А.В., Бибилашвили Ю.К. Теплофизические средства неразрушающего исследования герметичности и параметров газа в твэлах реакторов. *Атомная энергия*. 1996;80(1):20–26. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t80-1_1996/p20/ (дата обращения 17.01.2026).

6. Новиков А.Ю., Зеленчук А.В., Пастушин В.В. и др. Способ определения давления газа в тепловыделяющих элементах ядерных реакторов: пат. 2049316. Российская Федерация: МПК G01L 11/00; заявл. 08.01.1992; опубл. 27.11.1995. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&rn=235&DocNumber=2049316&TypeFile=html (дата обращения 12.07.2026).

7. Зорин В.М. Способ бесконтактного измерения давления в трубопроводе и устройство для осуществления этого способа: авторское свидетельство 161518. Союз Советских Социалистических Республик: МПК G01f, G01L, G08c; заявл. 07.11.1962; опубл. 19.11.1964. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&rn=3949&DocNumber=161518&TypeFile=html (дата обращения 12.07.2026).

8. He Weidong, Zheng Xianfeng, Zhang Pan et al. Non-contact pressure measurement method and system based on strain and temperature sensors: пат. 111649869. Китайская Народная Республика: МПК G01L 19/00, G01L 19/04, G01L 27/00; заявл. 23.06.2020; опубл. 11.09.2020 URL: https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN306882949&_cid=P12-MRFBWB-97975-1 (in Chinese).

9. Монахов А.Д., Яковлев Н.О., Автаев В.В., Котова Е.А. Разрушающие методы определения остаточных напряжений (обзор). *Труды ВИАМ*. 2021;9:95–104. DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-9-95-104>

10. Бобровский Я.О. Способ определения давления среды в герметичной емкости: пат. 2861694. Российская Федерация: МПК G01L 9/04; заявл. 05.06.2025; опубл. 07.05.2026. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&rn=1696&DocNumber=2861694&TypeFile=html (дата обращения 12.07.2026).

11. Орлов А.А., Верлинский М.В., Малюгин Р.В. Влияние размера вертикальных ребер на десублимацию UF_6 в вертикальных погружных емкостях. *Атомная энергия*. 2021;131(1):39–43. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t131-1_2021/p39/ (дата обращения 17.01.2026).

12. Балабух Л.И., Колесников К.С., Зарубин В.С. и др. Основы строительной механики ракет. М.: Высшая школа, 1969, 496 с. EDN: <https://elibrary.ru/vtitkh>

13. Ansys, Inc. (сайт). URL: <https://www.ansys.com/> (дата обращения 17.01.2026).

14. ГОСТ Р 57700.10-2018. Численное моделирование физических процессов. Определение напряженно-деформированного состояния. Верификация и валидация численных моделей сложных элементов конструкций в упругой области. М.: Стандартинформ, 2018. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200158272> (дата обращения 12.07.2026).

15. Белостоцкий А.М., Дубинский С.И., Аул А.А. Верификация программных комплексов для решения наукоемких задач строительного профиля (в системе ПААСН). Опыт и перспективы. *Вестник МГСУ*. 2010;4–5:186–190. EDN: <https://elibrary.ru/rtujsl>

16. АО «НИЦ СтаДиО» (сайт). URL: <https://www.stadyo.ru/> (дата обращения 04.04.2026).

17. Юдин А.С., Щитов Д.В. О расчете эллиптических оболочек вращения, нагруженных внутренним давлением. *Известия вузов. Северо-кавказский регион. Серия: Естественные науки*. 2004;S3:29–36. EDN: <https://elibrary.ru/hsotnd>

18. ГОСТ 30893.1-2002 (ИСО 2768-1-89). Основные нормы взаимозаменяемости. Общие допуски. Предельные отклонения линейных и угловых размеров с неуказанными допусками. Минск, Издательство стандартов, 2003. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200032262> (дата обращения 12.07.2026).

19. ГОСТ 19903-2015. Прокат листовой горячекатанной. Сортамент. М.: Стандартинформ, 2016. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200133726> (дата обращения 12.07.2026).

20. Назыров З.В. Экспериментальное исследование зависимости показаний ультразвукового толщиномера от температуры. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2016;4:69–74. EDN: <https://elibrary.ru/xefchx>

21. Ерасов В.С., Пацак М.М., Заребалов А.А. Способ определения модуля упругости материала: авторское свидетельство 1758475. Союз Советских Социалистических республик: МПК G01N 3/00; заявл. 21.05.1990; опубл. 30.08.1992. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPATOLD&DocNumber=1758475&TypeFile=html

22. Бульбович Р.В., Пальчиковский В.Г., Садиков Я.С., Мурзыев Э.Н. Способ определения коэффициента Пуассона материала: авторское свидетельство 1755105. Союз Советских Социалистических Республик: МПК G01N 3/00; заявл. 07.05.1990; опубл. 15.08.1992. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&rn=1257&DocNumber=1755105&TypeFile=html (дата обращения 12.07.2026).

23. Белозеров Ю.С., Князев А.В., Кодеес Б.Н. и др. Линейный коэффициент теплового расширения железа различного изотопного состава. *Неорганические материалы*. 2021;57(11):1202–1206. EDN: <https://elibrary.ru/xrpbcm>

24. ФГБУ «Гидрометцентр России» (сайт). URL: <https://meteoinfo.ru/> (дата обращения 17.09.2025).

25. Mohammed A.A.S., Moussa W.A., Lou E. High sensitivity MEMS strain sensor: Design and Simulation. *Sensors*. 2008;8(4):2642–2661. DOI: <https://doi.org/10.3390/s8042642>

26. Правила промышленной безопасности при использовании оборудования, работающего под избыточным давлением: утверждены Приказом Ростехнадзора от 15.12.2020 № 536 (зарегистрировано в Минюсте России 31.12.2020 № 61998).

Поступила в редакцию 13.01.2026

После доработки 12.07.2026

Принята к опубликованию 10.09.2026

Автор

Бобровский Ян Олегович, инженер-конструктор 2 категории,

E-mail: bobr.yanSM@yandex.ru

UDC: 621.039.743; 53.083.9; 539.3.

Non-contact Pressure Measurement in Depleted Uranium Hexafluoride Containers Based on Mechanical Response to Heat Exposure

Bobrovskiy Y.O.

NIKIET JSC,

1, bldg. 3 Acad. Dollezhal Sq., 107140 Moscow, Russia

Abstract

Depleted uranium hexafluoride (DUHF) containers are stored at outdoor areas of enrichment facilities for decades. While stored, a dangerously high excess pressure can occur inside them, which can result in an accident while opening. The pressure is expedient to be controlled regularly for detection of potentially dangerous containers in advance. However, pressure measurement by means of traditional gauges may be impossible, which demands usage of non-contact pressure measurement methods. The existing non-contact pressure measurement methods are of little use in DUHF containers pressure control.

Article purpose is to describe a fundamentally new method of non-contact pressure measurement in relation to DUHF containers pressure control. The method involves using strain and temperature sensors to detect container response to heat exposure and subsequent using measure results for pressure calculation. A simple theoretical relationship coupling measured strain and temperature with pressure by means of A and B coefficients is given. A and B coefficients definition issues have been investigated. Accuracy assessment of non-contact pressure measurement in DUHF container by means of described method has been executed. The minimal achievable pressure measurement absolute error, taking into account A and B errors, was $\pm 1,2$ atm. The minimal achievable pressure measurement absolute error, without taking into account A and B errors, was $\pm 0,4$ atm. The high errors are explained by a high stiffness of the DUHF container.

Keywords: radioactive waste management, nuclear safety, depleted uranium hexafluoride, non-contact pressure measurement, mechanics of deformable solid, shell stress-strain state, strain measurement.

For citation: Bobrovskiy Y.O. Non-contact pressure measurement in depleted uranium hexafluoride containers based on mechanical response to heat exposure. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2026;3:123–141. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.3.09> (in Russian).

References

1. Gonek N.F. Pressure gauges. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1979, 176 p. (in Russian).
2. Muratov O.E. Handling problems of depleted uranium hexafluoride (review). Theoretical and Applied Ecology. 2020;4:13–21. DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-4-013-021> (in Russian).
3. Reshetnikov F.G., Bibilashvili Yu.K., Golovnin I.S., Gorskiy V.V., Kazennov Yu.I., Men'shikova T.S., Nikulina A.V., Romanev V.V. Development, production and operation of power reactors fuel elements. In 2 books. Book 2. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1995, 336 p. ISBN 5-283-03615-4 (in Russian).
4. Tomshina A.A., Stelyuk A.Yu., Lesin V.V., Ermolova O.B., Lebedev S.M. The method of ultrasonic control of helium pressure under the fuel element cladding. *Aspects of nuclear science and engineering. Series: materials science and new materials (VANT)*. 2019;3:78–87. EDN: <https://elibrary.ru/ehppfz> (in Russian).
5. Pastushin V.V., Novikov A.Yu., Zelenchuk A.V., Bibilashvili Yu.K. Thermophysical means for nondestructive investigation of the airtightness and gas parameters in reactor fuel elements. *Atomic energy*. 1996;80(1):20–25. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02415750>
6. Novikov A.Yu., Zelenchuk A.V., Pastushin V.V., Safronov A.D., Eremin V.V., Ermolaev I.E., Demidov D.A., Bibilashvili Yu.K. Method of gas pressure measurement in fuel elements of nuclear reactors. Russian Federation patent no. 2049316. IPC G01L 11/00. Claimed Jan. 08, 1992. Published Nov. 27, 1995 URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPA&rn=235&DocNumber=2049316&TypeFile=html (accessed Jul. 12, 2026) (in Russian).
7. Zorin V.M. Method of non-contact pressure measurement in pipe and device for method realization. Union of Soviet Socialist Republics patent no. 161518. IPC G01f, G01L, G08c. Claimed Nov. 07, 1962. Published Nov. 19, 1964. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&rn=3949&DocNumber=161518&TypeFile=html (accessed Jul. 12, 2026) (in Russian).
8. He Weidong, Zheng Xianfeng, Zhang Pan, Zhang Haifei, Zhang Jianbin, Du Shuancai. Non-contact pressure measurement method and system based on strain and temperature sensors. The People's Republic of China patent no. 111649869. IPC G01L 19/00, G01L 19/04, G01L 27/00. Claimed Jun. 23, 2020. Published Sep. 11, 2020. URL: https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN306882949&_cid=P12-MRFBWB-97975-1 (accessed Jul. 12, 2026) (in Chinese).

9. Monakhov A.D., Yakovlev N.O., Avtaev V.V., Kotova E.A. Destructive methods for determining residual stresses (review). *VIAM proceedings*. 2021;9:95–104. DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-9-95-104> (in Russian).
10. Bobrovskiy Y.O. Method for Determining Pressure of Medium in Sealed Container. Russian Federation patent no. 2861694. IPC G01L 9/04. Claimed Jun. 05, 2025. Published May 07, 2026. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&rn=1696&DocNumber=2861694&TypeFile=html (accessed Jul. 12, 2026) (in Russian).
11. Orlov A.A., Verlinskii M.V., Malyugin R.V. Influence of vertical rib size on UF₆ desublimation in vertical submersible tanks. *Atomic energy*. 2021;131(1):37–41. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-022-00833-z>
12. Balabuh L.I., Kolesnikov K.S., Zarubin V.S., Alfutov N.A., Usyukin V.I., Chizhov V.F. Foundations of rocket construction mechanics. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1969, 496 p. EDN: <https://elibrary.ru/vtitkh> (in Russian).
13. Ansys, Inc. (website). URL: <https://www.ansys.com/> (accessed Jan. 17, 2026).
14. GOST R 57700.10-2018. Numerical modelling of physical processes. Stress-strain state definition. Verification and validation of complex structural elements numerical models in the elastic domain. Moscow, Standartinform Publ., 2018. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200158272> (accessed Jul. 12, 2026) (in Russian).
15. Belostotsky A.M., Dubinsky S.I., Aul A.A. Experience of program packages verification for civil engineering scientific problems. *Vestnik MGSU*. 2010;4-5:186–190. EDN: <https://elibrary.ru/rtujsl> (in Russian).
16. Stadyo Science & Research Center (website). URL: <https://www.stadyo.ru/> (accessed 04.04.2026).
17. Judin A.S., Schitov D.V. On internal pressure loaded elliptical rotation shells analysis. *Izvestiya vuzov. Severo-kavkazskij region. Seriya: Estestvennye nauki*. 2004;S3:29–36. EDN: <https://elibrary.ru/hsotnd> (in Russian).
18. ISO 2768-1-89. General tolerances – part 1: Tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications. Geneva, International Organization for Standardization Publ., 1989.
19. GOST 19903-2015. Hot-rolled sheet metal. Product range. Moscow, Standartinform Publ., 2016. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200133726> (accessed Jul. 12, 2026) (in Russian).
20. Nazyrov Z.V. Experimental study of dependence of ultrasonic thickness gauge readings on temperature. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2016;4:69–74. EDN: <https://elibrary.ru/xfchx> (in Russian).
21. Erasov V.S., Pacak M.M., Zagrebalov A.A. Material elastic modulus definition method. Union of Soviet Socialist Republics patent no. 1758475. IPC G01N 3/00. Claimed May 21, 1990. Published Aug. 30, 1992. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPATOLD&DocNumber=1758475&TypeFile=html (in Russian).
22. Bul'bovich R.V., Pal'chikovskij V.G., Sadikov Ja.S., Murzyev Je.N. Material Poisson's ratio definition method. Union of Soviet Socialist Republics patent no. 1755105. IPC G01N 3/00. Claimed May 07, 1990. Published Aug. 15, 1992. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&rn=1257&DocNumber=1755105&TypeFile=html (accessed Jul. 12, 2026) (in Russian).
23. Belozerov Yu.S., Knyazev A.V., Kodess B.N., Shipilova A.S., Steshin M.O., Troshin O. Yu., Bulanov A.D. Effect of the isotopic composition of Fe on it's linear thermal expansion coefficient. *Inorganic materials*. 2021;57(11):1135–1139. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0020168521110029>

24. FSBI «Hydrometcenter of Russia» (website). URL: <https://meteoinfo.ru/> (accessed Sep. 17, 2025) (in Russian).
25. Mohammed A.A.S., Moussa W.A., Lou E. High sensitivity MEMS strain sensor: Design and Simulation. *Sensors*. 2008;8(4):2642–2661. DOI: <https://doi.org/10.3390/s8042642>
26. Industrial safety regulations for operating of equipment under excess pressure: approved by Rostekhnadzor order №536 dated Dec. 15, 2020 (registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation № 61998 dated Dec. 31, 2020) (in Russian).

Author

Yan O. Bobrovskiy, 2nd category design engineer,
E-mail: bobr.yanSM@yandex.ru