



Научная статья

УДК 54.07:542.2:544.07:62-9:62-93

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-23-38>

Лабораторный комплекс для моделирования и исследования работы встроенной теплозащиты на первом этапе производства энергоэффективных корпусов сосудов высокого давления

Д.А. Еловенко^{1✉}, П.Г. Пимштейн², К.А. Кузнецов³¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия^{2,3}ИркутскНИИхиммаш, г. Иркутск, Россия

Резюме. Цель – доказательство работоспособности созданного и запатентованного лабораторного испытательного комплекса, моделирующего работу под высоким давлением теплозащитного барьера корпусов сосудов большого давления и позволяющего определить теплопроводность материала теплозащиты. Моделирование работы теплозащитного барьера в испытательном комплексе осуществлялось в условиях высокого давления (до 50–70 МПа). Для создания и регулировки давления на слой теплозащиты использовался пресс разрывной машины Instron 5989, входящий в состав комплекса. Контроль изменения теплового поля и оценка эффективности работы теплоизоляционного материала осуществлялись расчетным путем на основании показаний температурных значений в контрольных точках верхнего и нижнего стержней установки. Данные значения были получены контактным (с использованием термопар поверхностного контроля температуры) либо бесконтактным (с использованием тепловизионного оборудования) способами. Проведено пилотное (тестовое) исследование работы теплозащиты из материала «теннисит» при различном давлении. Показано, что при давлении на материал 30 МПа толщина образца составляла 4,64 мм, при 40 МПа – 4,35 мм, а при давлении в 50 МПа – 4,00 мм. Установлено, что изменение давления практически не влияет на теплопроводность образца из исследуемого материала: при давлении в 30 МПа падение температуры на нем составило 198°C, при 40 МПа – 188°C, а при давлении в 50 МПа – 190°C. Показана эффективность моделирования работы теплозащиты исследуемого материала: при малой толщине слоя (в 4 мм) в условиях внутреннего давления в 50 МПа и рабочей температуры внутри корпуса оборудования до 300°C материал способен снизить уровень теплового воздействия на защищаемую часть конструкции ~ в 3 раза (с 298,6°C до 108,4°C). Представленная конструкция предназначена для моделирования и исследования поведения различных теплозащитных барьерных материалов, эксплуатируемых под высоким давлением. Результаты тестирования показали работоспособность предлагаемого лабораторного комплекса.

Ключевые слова: лабораторный комплекс, моделирование работы теплозащиты, теплоизоляционный материал, корпус сосуда давления, предпроизводственный этап в химическом машиностроении

Для цитирования: Еловенко Д.А., Пимштейн П.Г., Кузнецов К.А. Лабораторный комплекс для моделирования и исследования работы встроенной теплозащиты на первом этапе производства энергоэффективных корпусов сосудов высокого давления // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 1. С. 23–38. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-23-38>.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Laboratory installation for simulating and investigating the performance of built-in thermal protection at the first stage of manufacturing energy-efficient shells for high-pressure reservoirs

Denis A. Elovenko^{1✉}, Pavel G. Pimshtein², Kirill A. Kuznetsov³

¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^{2,3}JSC IrkutskNIIhimmash, Irkutsk, Russia

Abstract. In this work, we aim to validate the efficiency of the previously created and patented laboratory test installation for simulating the high-pressure operation of a thermal barrier of high-pressure reservoirs and for determining the thermal conductivity of thermal barrier materials. Simulation of thermal barrier operation in the test installation was carried out under elevated pressures (up to 50–70 MPa). The pressure on the thermal barrier layer was created and regulated by an Instron 5989 test machine as part of the installation. Control of temperature changes and evaluation of the thermal insulation performance were performed by a calculation method based on temperature readings in the control points of the upper and lower rods of the installation. These values were obtained by contact (using thermocouples of surface temperature control) or non-contact (using thermal imaging equipment) methods. A pilot study into the performance of a thermal barrier material “tennesite” was carried out at different pressures. At pressures of 30, 40 and 50 MPa, the thickness of the tested samples comprised 4.64 mm, 4.35 mm and 4.00 mm, respectively. Variations in pressure were established to have a negligible effect on the thermal conductivity of the studied material. Thus, at pressures of 30, 40 and 50 MPa, the temperature drop in the samples comprised 198°C, 188°C and 190°C, respectively. The installation showed high efficiency in simulating the thermal protection of the studied material. Thus, at a layer thickness of 4 mm under the internal pressure of 50 MPa and the working temperature inside the equipment housing up to 300°C, the material is capable of reducing the thermal impact on the protected part of the structure by about three times (from 298.6°C to 108.4°C). The presented design can be used when investigating the behavior of various thermal barrier materials operated under elevated pressures. The results obtained confirm the efficiency of the proposed laboratory installation.

Keywords: laboratory complex, modelling of thermal insulation operation, heat-insulating material, pressure vessel casing, pre-production stage in chemical engineering

For citation: Elovenko D.A., Pimshtein P.G., Kuznetsov K.A. Laboratory installation for simulating and investigating the performance of built-in thermal protection at the first stage of manufacturing energy-efficient shells for high-pressure reservoirs. *iPolytech Journal*. 2023;27(1):23-38. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-23-38>.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие области применения новых теплоизоляционных материалов для повышения мощности и эффективности технологического оборудования, работающего под высокими давлением и температурой и используемого для химических, нефтехимических, ядерных и других производств [1–4], требует моделирования условий работы и исследования характеристик теплоизолирующих материалов с максимальным приближением к реальным условиям.

Практика использования технологического оборудования в нашей стране и за рубежом, которое не имеет специальной теплозащиты от нежелательного нагрева цилиндрической части корпуса сосуда, показывает наличие

характерных дефектов, возникающих в процессе эксплуатации. Так, например, в КНР эксплуатация реакторов для производства мочевины [5–7, 9–10], имеющих многослойный цилиндрический корпус, не защищенный слоем встроенной теплоизоляции [1–2], по истечении определенного периода времени приводит к появлению радиальных и кольцевых трещин в поперечном сечении кольцевых сварочных швов, соединяющих многослойные компоненты корпуса сосуда [5–10]. Также в результате негативного перегрева корпуса сосуда, не изолированного от теплового воздействия технологического (реакционного) пространства, появляются трещины на его поверхности (снаружи) либо на крайних наружных слоях [10–11]. По этим же причинам могут

разрушаться и витые многослойные конструкции корпусов сосудов [12].

Установка внутренней теплоизоляции над внутренним слоем в цилиндрическую часть корпуса сосуда с целью производства новых более совершенных и энергоэффективных единиц оборудования, повышающая его прочностные характеристики и снижающая вероятность возникновения трещин в различных зонах несущей части корпуса, невозможна без предварительного этапа тестирования и моделирования работы применяемого теплоизоляционного материала. Реализация данного этапа неразрывно связана со всем процессом производства новых единиц оборудования и является частью серьезной комплексной машиностроительной задачи.

Для моделирования поведения теплозащиты в реальных условиях требуется наличие лабораторного испытательного комплекса, состоящего из установки, моделирующей работу теплозащитного барьера под высоким давлением. Известно оборудование (приборы и установки), моделирующее работу материала как теплозащитного барьера. Объединяют такое оборудование принцип их применения и физические явления, на которых основана возможность их применения. В остальном это уникальные объекты.

В работе [13] предложена экспериментальная установка для измерения теплопроводности твердых теплоизоляционных материалов с погрешностью не более 10%. Также известна установка для экспериментального определения тепловых характеристик материалов, входящих в состав транспортных упаковочных комплектов в качестве элементов теплоизоляции [14]. Еще одна установка для эффективных измерений теплопроводности изоляции в диапазоне температур от 300 до 1650 °C в соответствии с ASTM C201-93 (Стандартный метод испытания на теплопроводность огнеупоров от англ. Standard Test Method for Thermal Conductivity of Refractories) и DIN V ENV-1094 (Огнеупорные изделия для изоляционных целей, от нем. Feuerfeste Erzeugnisse für Isolationszwecke) с диапазоном теплопроводностей 0,025–2 Вт/м·К исследуемого изотропного либо неизотропного материала известна из [15].

Экспериментальные установки для определения теплопроводности образцов пористых теплоизоляционных материалов представлены в работах [16–17]. Они могут моделировать поведение теплоизоляции как в стационарной, так и в динамической зоне при различных пространственных и временных градиентах температуры.

Установка для моделирования работы материала в условиях стационарного теплового потока и исследования теплопроводности конструкционных материалов в твердом агрегатном состоянии и области высоких температур представлена в [18].

В [19, 20] представлено оборудование, позволяющее моделировать и исследовать процесс теплопередачи по толщине многослойной теплоизоляции и коэффициент измерения теплопроводности различных материалов. Измерение коэффициентов теплопроводности строительных сыпучих материалов, различных упаковок и тары также возможно с помощью разработки [21], а с применением установки [22] возможно определение теплопроводности литейной формы.

Область применения известного прибора ИТ-3, моделирующего работу теплоизоляции для исследования широкого класса твердых тел и материалов изучается в [23].

Оборудование [24] представлено университетом Цинь-Хуа для моделирования теплозащиты и определения эффективной теплопроводности с целью повышения точности расчетов и анализа безопасности конструкции китайского высокотемпературного газоохлаждаемого реактора.

Известен также прибор для моделирования работы теплоизоляции в диапазоне 100–500 Вт/(мК) с погрешностью измерения не более 5% и температурой до 70 °C [25]. Еще одна установка, работающая уже в более низком диапазоне от 0,04 до 2,0 Вт/(мК) с погрешностью измерения не более 7% и временем моделирования процесса от 1 до 30 мин, показана в [26].

Отметим также и экспериментальную установку для измерения теплопроводности грунтов и горных пород [27].

Проведенный анализ на данный момент показал отсутствие какого-либо оборудования

или приборов, позволяющих моделировать работу теплозащиты под действием высокого давления. Стоит только отметить существование установки для измерения теплопроводности осадочных горных пород при высоких давлениях до 250 МПа и температурах (до 300°C) на основе метода линейного источника тепла постоянной мощности [28]. Однако целевой функцией этого оборудования не является решение комплексной машиностроительной задачи, обозначенной нами выше.

Также известна весьма простая установка для моделирования и исследования теплозащитной функции материалов, в которой образец помещают в толстостенную медную трубку с одним запорным концом [29].

Целью настоящего исследования является предложение по реализации возможности моделирования и исследования поведения и работы теплозащиты корпусов сосудов высокого давления в реальных условиях как предпроизводственного этапа решения комплексной проблемы в химическом машиностроении, направленной на производство новых энергоэффективных единиц оборудования с более высокими прочностными характеристиками.

Авторами работы спроектировано, изготовлено и оттестировано оригинальное оборудование специально для изучения геометрических и силовых параметров прессы разрывной машины фирмы «Instron» (в работе использовалась универсальная электромеханическая испытательная система Instron 5989). Оно образует с прессом единый лабораторный комплекс, позволяющий моделировать и исследовать поведение и работу теплоизоляционных материалов с целью защиты конструктивных узлов или элементов оборудования (сосудов, аппаратов, реакторов под высоким давлением) от высокотемпературного воздействия на первом этапе производственного цикла нового энергоэффективного оборудования. Представляемый нами лабораторный комплекс является абсолютно новым и уникальным объектом приборостроения, а входящая в его состав установка была запатентована авторами настоящей работы [30]. Проект и создание данного комплекса основаны на успешном опыте создания и

применения ранее предложенной установки для исследования контактной теплопроводности листового проката в работе [31].

УСТРОЙСТВО УСТАНОВКИ

Установка (рис. 1) состоит из верхнего и нижнего стержней 1 и 2 из стали 12X18H10T, основания 3, нижней проставки 4 и кожуха 6, а также расположенной между ними шайбы 5. Наружный теплоизоляционный кожух установки 7 выполнен цельным из асбоцементной трубы. Между верхним и нижним поршнями в контейнере 8, который может быть выполнен из керамического или другого материала с малой теплопроводностью, находится исследуемый материал. Перегородка 9 разделяет камеру нагревателя и функциональную камеру, в которой достигается стационарный тепловой поток. Кольцо 10 призвано обеспечить соосность между наружным теплоизоляционным кожухом и стержнями 1 и 2. В нижней части установки находится охладитель, питаемый холодной проточной водой через штуцеры входа и выхода 11. Сверху камеру с нагревателем закрывает асбестовый диск 12, а между двух технологических кожухов расположен асбестовый шнур 13. Верхний и нижний стержни (рис. 2 а и б) выполнены из нержавеющей стали 12X18H10T, коэффициенты теплопроводности которой в широком диапазоне температур исследованы в [32]. Верхняя часть поршня нагревателя имеет радиальную точку для монтажа в ней спирального нагревательного элемента в теплопроводящей диэлектрической оболочке, которая исключает возможность замыкания электрического тока на стержни и корпус установки. Нижняя часть стержня охладителя имеет крестообразное сверление сквозными отверстиями, оси которых расположены в одной плоскости и перпендикулярно друг к другу (рис. 2 с) для повышения степени эффективности зоны охлаждения.

Основание 3 приварено к нижнему стержню ручной дуговой сваркой (см. рис. 1) и с нижней проставкой 4, шайбой 5 и штуцерами 11, которые сварены таким же способом, образует герметичную камеру охладителя, рассчитанную на давление проточной воды холодного водоснабжения.

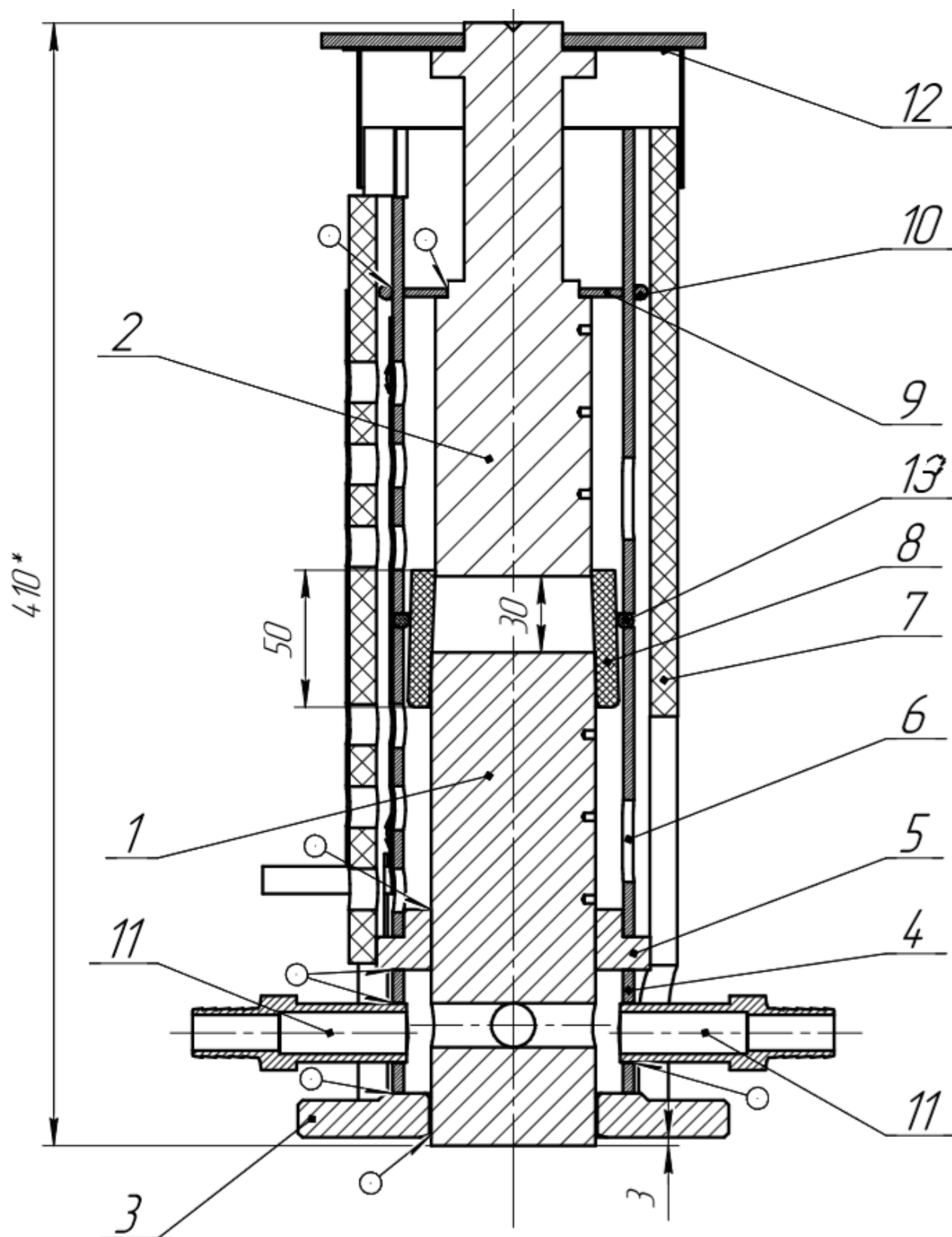


Рис. 1. Конструктивная схема основных элементов установки для исследования теплопроводности порошкообразных и гранулированных материалов под высоким давлением
 Fig. 1. Design diagram of the main elements of the installation to study thermal conductivity of powdered and granular materials under high pressure

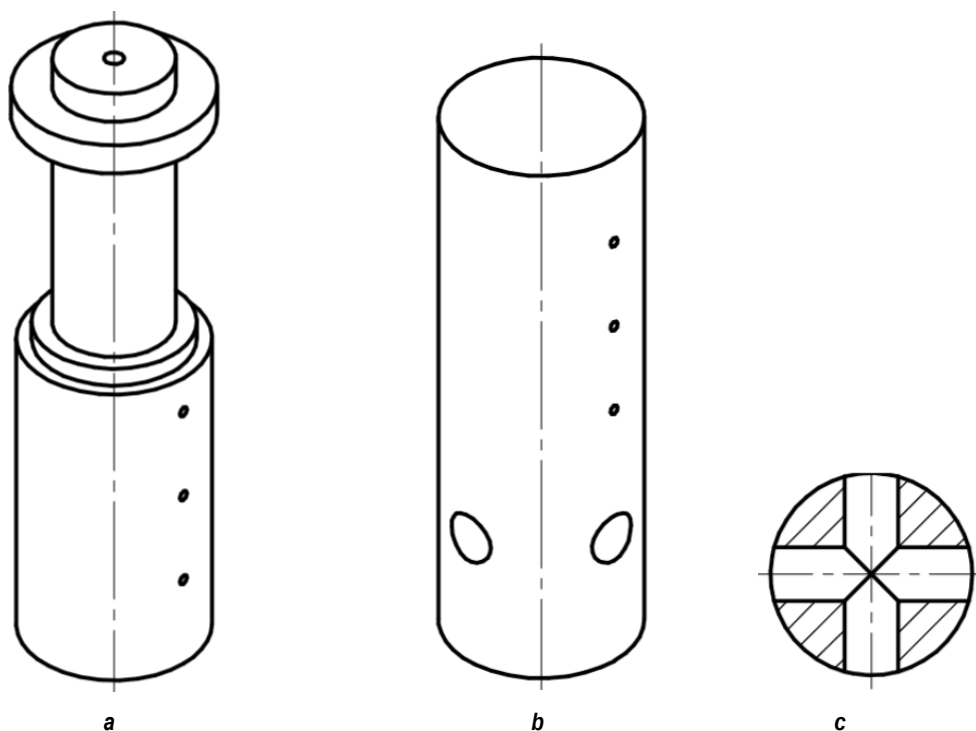


Рис. 2. Верхний стержень нагревателя (а), нижний стержень охладителя (b), крестообразное сверление нижнего стержня охладителя (с)

Fig. 2. Upper heater rod (a), lower cooler rod (b), cross drilling of the lower cooler rod (c)

Функциональная камера, в которой достигается стационарный тепловой поток, текущий через стержни и исследуемый материал, расположенный между ними, образована составным металлическим кожухом (рис. 3 а), который при монтаже обматывается специальной теплоизолирующей лентой из стеклоткани для полного исключения радиальных теплотерь и поддержания эквивалентных температур стержней и этого кожуха. Металлический кожух отделен от внешней среды асбоцементной трубой 7 толщиной 10 мм (рис. 3 b) с целью исключения потерь тепла в окружающую среду. На асбоцементную трубу в целях безопасности одевается металлическая скоба (рис. 3 с), которая блокирует нежелательное смещение ее частей в случае разрушения от чрезмерного нагрева.

Отметим, что внутренняя поверхность составного металлического экрана в радиальном направлении должна находиться на расстоянии меньше или равном 10 мм от поверхности соответствующего стержня с целью исключения явления конвективного теплообмена (конвекции) [33]. А прокладка из асбестового шнура 13 (см. рис. 1) блокирует поток тепла между частями

кожуха 6 в осевом направлении, имитируя температуры верхнего и нижнего стержней.

Исследуемый материал представляет из себя сыпучее порошкообразное (гранулированное) вещество, способное располагаться между верхним и нижним стержнями в специальном контейнере 8, его материал должен иметь низкую тепловую проводимость и достаточную прочность, способную выдержать тепловое расширение нижнего поршня, на который он насаживается (одевается).

ПРИНЦИП РАБОТЫ

Моделирование реальных условий работы теплозащиты и оценка ее эффективности для применения в процессе производства энергоэффективных корпусов сосудов в качестве встроенной теплоизоляции реализуется путем создания и поддержания стационарного теплового потока в цилиндрических частях контрольной зоны верхнего и нижнего поршней, Между которыми в замкнутом объеме расположен исследуемый материал, образующий вместе с ними аналог плоской многослойной (составной) стенки [33], по ней пропускается тепловой поток.

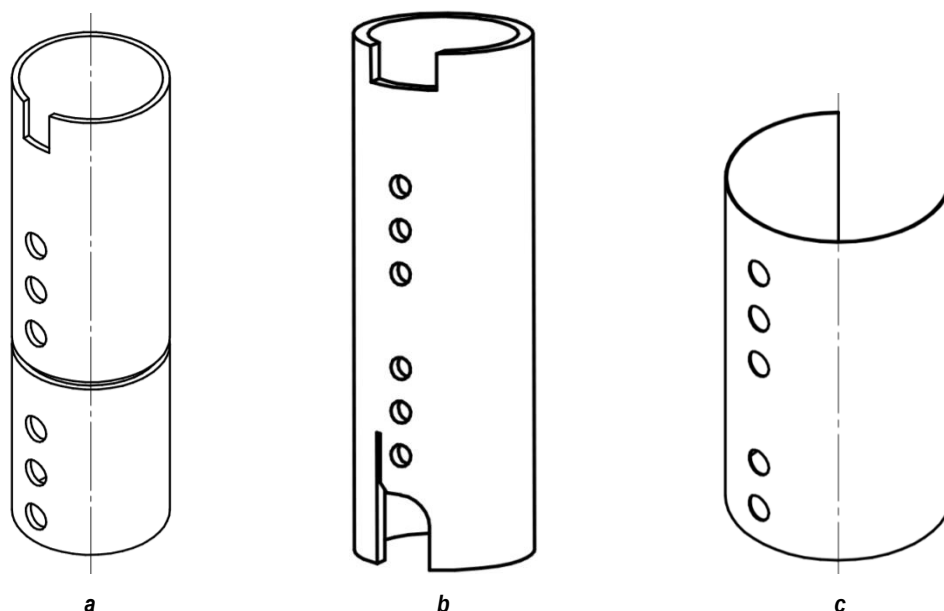


Рис. 3. Внутренний составной кожух из стали (а), наружный теплоизоляционный кожух из асбоцемента (b) и защитная скоба из нержавеющей стали (с)

Fig. 3. Composite inner casing made of steel (a), external heat insulation casing made of asbestos cement (b) and a protective bracket made of stainless steel (c)

Источником тепла является нагревательный элемент, выполненный из скрученной в спираль проволоки из нихрома, на нее одеты теплопроводящие диэлектрические кольца (рис. 4). Он размещается в специально изготовленной конструкции (проточке верхнего стержня) (см. рис. 2 а) во время монтажа установки перед экспериментом.

Охладитель представляет собой замкнутую камеру, сваренную ручной дуговой сваркой с нижним цилиндром воедино (см. рис. 1), и имеет два штуцера для подачи проточной холодной воды и ее отвода. Заполнение камеры охладителя обеспечивается наличием давления при подаче, которое поддерживается в бытовой сети холодного водоснабжения.

Контроль теплового поля в функциональной камере установки осуществляется посредством тепловизионного оборудования через специальные отверстия, выполненные в обоих кожухах (см. рис. 3).

Установка предназначена для моделирования и исследования теплозащиты на предпроизводственном этапе с целью ее применения в процессе производства энергоэффективных корпусов сосудов высокого давления в качестве встроенной теплоизоляции и защищающей от теплового воздействия

технологического пространства основную (несущую) часть корпуса сосуда.



Рис. 4. Зона нагревателя на верхнем стержне установки

Fig. 4. The heater zone on the upper rod of the installation

Конструктивная компоновка и габаритные размеры установки были спроектированы специально под геометрические характеристики пресса разрывной машины Instron 5989. Для обеспечения базирования установки на нижней траверсе пресса был предусмотрен небольшой выход торцевой поверхности нижнего стержня охладителя за плоскость основания размером 3 мм (см. рис. 1). В свою очередь, свободная торцевая поверхность стержня нагревателя имеет центрирующее углубление (см. рис. 1 и 2 а), в котором размещается металлический сферический упор (рис. 5), направляющий вектор приложения сжимающей силы строго к оси вращения стержня нагревателя и создающий максимально равномерное сжатие им исследуемого материала в контейнере.

Стоит отметить, что применение такого сферического упора на прессе разрывной машины Instron 5989 вовсе не обязательно, так как ее верхняя траверса имеет сферический поворотный шарнир, который уже выполняет функцию выравнивания сжимающего усилия и обеспечивает вертикальность его направления.

После сборки установки и ее монтажа между траверсами пресса (универсальной разрывной машины) (рис. 5) нагревательный элемент подключается к электрической сети переменного тока напряжением 220В через специальный регулируемый блок питания с возможностью точного изменения напряже-

ния с 220 до 50 В и расчетной нагрузкой нагревательного элемента до 4 кВт. Таким образом, благодаря прибору изменения величины напряжения появляется возможность точного управления температурой нагрева. Регулирование температурного режима также осуществляется с помощью охладителя путем подвода и пропускания через него проточной холодной воды с различной скоростью протекания либо создания циркуляции специальной охлаждающей жидкости посредством специальных шлангов.

ИСПЫТАНИЕ

Испытание и настройка работы лабораторного комплекса проходила в Научно-исследовательской лаборатории испытания строительных материалов и конструкций Иркутского национального исследовательского технического университета (рис. 6).

Для обеспечения работоспособности комплекса и выполнения им целевой функции моделирования работы теплозащиты достаточно получить стационарный тепловой поток в направлении от нагревателя к охладителю при полном контакте торцевых поверхностей верхнего и нижнего стержней, контактное давление между которыми в процессе эксперимента и снятия показаний температуры составляло 25 МПа. Как показано в [33], тепловой поток справедливо рассматривать как проходящий через плоскую двухслойную стенку.

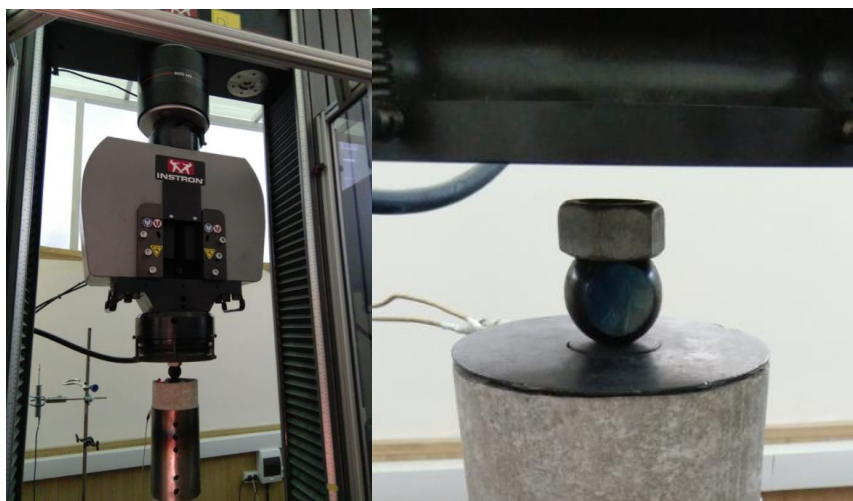


Рис. 5. Размещение (базирование) установки на прессе
Fig. 5. Installation placing (basing) on the press

После разогрева установки возникновение стационарного теплового потока, когда его плотность на всех участках будет одинаковой, было принято считать постоянным к моменту отсутствия изменения температурных значений в верхней и нижней крайних контрольной точках, три из которых расположены на стержне нагревателя и две – на стержне холодильника.

Значения температуры регистрировались с помощью профессиональной тепловизионной камеры Flir T420. Повышая температуру нагревательного элемента с целевым значением температуры в верхней контрольной точке до 400°C, получены следующие значения при стационарном нагретом состоянии под давлением 25 МПа (рис. 7 а–е). Такие же значения температур были получены и с помощью термопары поверхностного контактного (точечного) метода измерения, которой фиксировались значения температур в

соответствующих контрольных точках.

Расстояние между смежными контрольными точками каждого стержня составляет 30 мм, а между смежными (ближайшими) контрольными точками стержня нагревателя и охладителя (точки 3 и 4) равно 65 мм (рис. 8).

В результате фиксации температурных показаний и расчетов плотностей тепловых потоков на каждом участке (таблица) установлено, что погрешность их распределения не превышала 7%, а средняя плотность общего теплового потока между точками 1 и 5 составила 43662,42 Вт/м².

Максимально возможная температура в контрольной точке № 1, при которой возможно достигнуть равномерного распределения плотности теплового потока по всей функциональной камере, а, следовательно, сохранить и целевое назначение установки, равна 420°C. С увеличением температуры нагрева

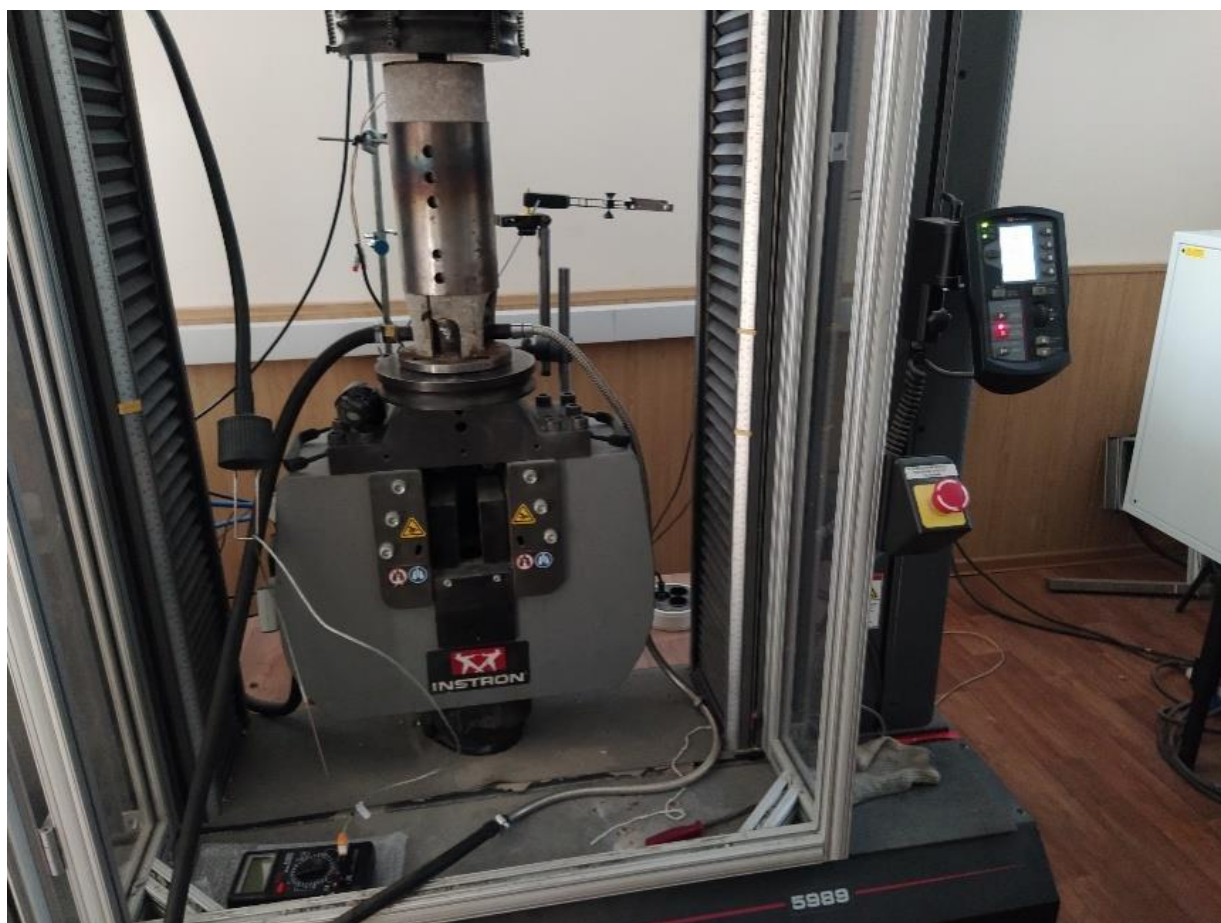


Рис. 6. Рабочее положение установки между траверсами пресса разрывной машины Instron 5989
Fig. 6. Installation service position between the press crossbars of the Instron 5989 tensile tester

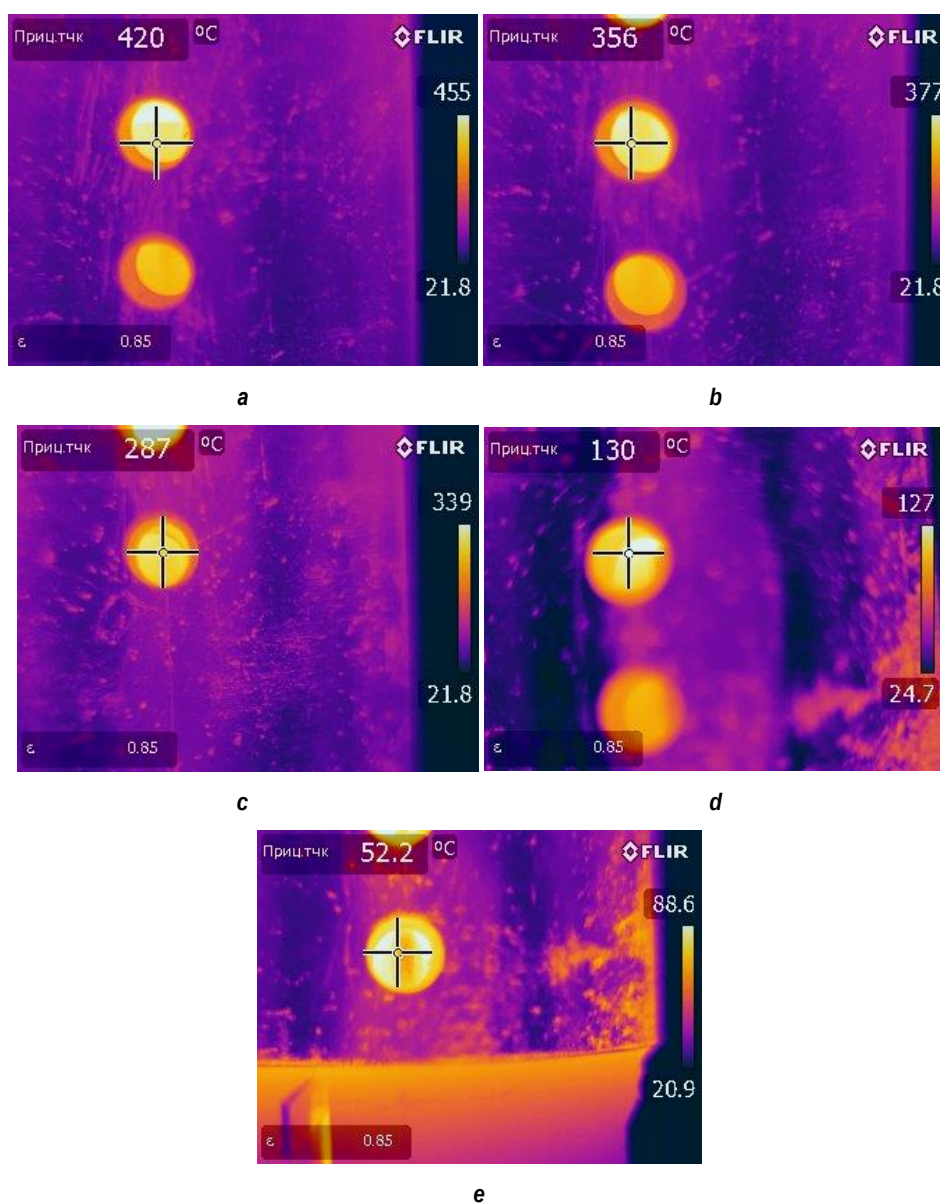


Рис. 7. Температурные показания, снятые тепловизионной камерой Flir T420
a, b, c – контрольные точки на цилиндрической поверхности стержня нагревателя;
d, e – контрольные точки на цилиндрической поверхности стержня охладителя

Fig. 7. Temperature readings taken by the Flir T420 thermal imaging camera
a, b, c – control points on the cylindrical surface of the heater rod;
d, e – control points on the cylindrical surface of the cooler rod

выше этого значения распределение плотности теплового потока по участкам функциональной камеры становится все более неравномерным. Связано это как с теплопроводящими свойствами стали 12X18H10T [32], так и, что является основополагающим фактором, с геометрическими размерами и особенностями компоновки установки. При этом стоит отметить, что высота установки немного более 400 мм (см. рис. 2) является

практически предельно возможным размером, который может быть установлен между траверсами пресса разрывной машины Instron 5989 при ее работе на сжатие. Диаметр стержней установки также был спроектирован с учетом возможного усилия машины Instron 5989 на сжатие, для обеспечения целевого значения по давлению на исследуемый в установке материал до 70 МПа.

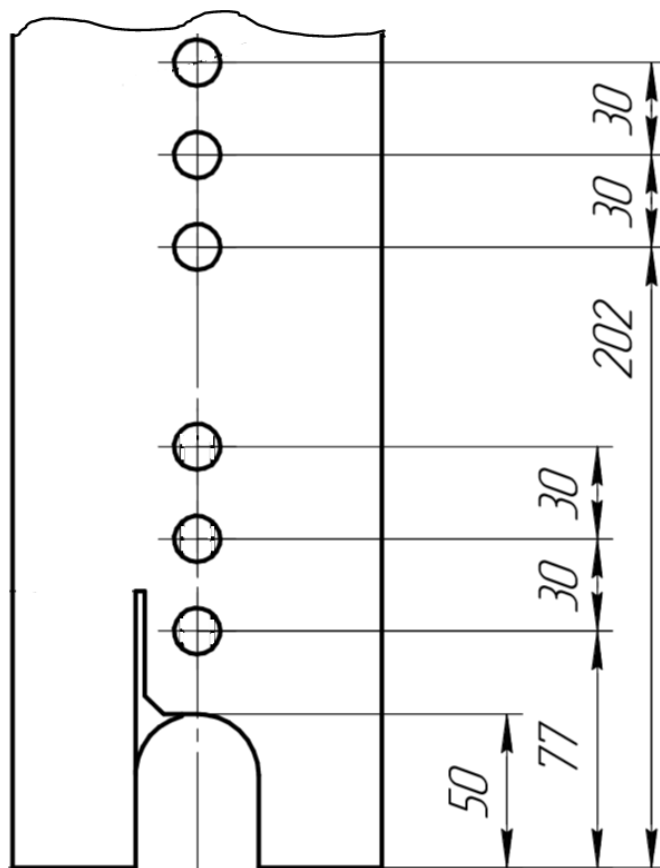


Рис. 8. Расположение контрольных окон на наружном (асбоцементной трубе) и внутреннем кожухах экспериментальной камеры установки
Fig. 8. Location of control windows on the outer (asbestos cement pipe) and inner casings of the experimental installation chamber

Результаты расчета плотностей тепловых потоков между контрольными точками
 Calculation results of heat flux densities between control points

№ участка	Длина участка l , м	Разница температур ΔT , °C	Плотность теплового потока q , Вт/м ²	Погрешность ε_q , %
1–2	0,03	64	43300,3	0,829
2–3	0,03	69	44350,9	1,577
3–4	0,065	157	43436,7	0,517
4–5	0,03	78	40566,5	7,091

С целью демонстрации возможности моделирования работы теплозащиты под высоким давлением на лабораторном комплексе, представленном авторами статьи выше, было проведено пилотное (тестовое) исследование материала «теннисит» под высоким давлением. При давлении в 30 МПа толщина образца составляла 4,64 мм, при давлении в 40 МПа – 4,35 мм, а при давлении в 50 МПа – 4,00 мм. Изменение давления практически не

влияет на теплопроводность образца из теннисита (рис. 9) и при давлении в 30 МПа падение температуры на нем составило 198°C, при давлении в 40 МПа – 188°C, а при давлении в 50 МПа – 190°C.

Представленный график демонстрирует возможность моделирования работы материала на лабораторном комплексе и показывает эффективность применения теннисита в качестве теплозащиты.

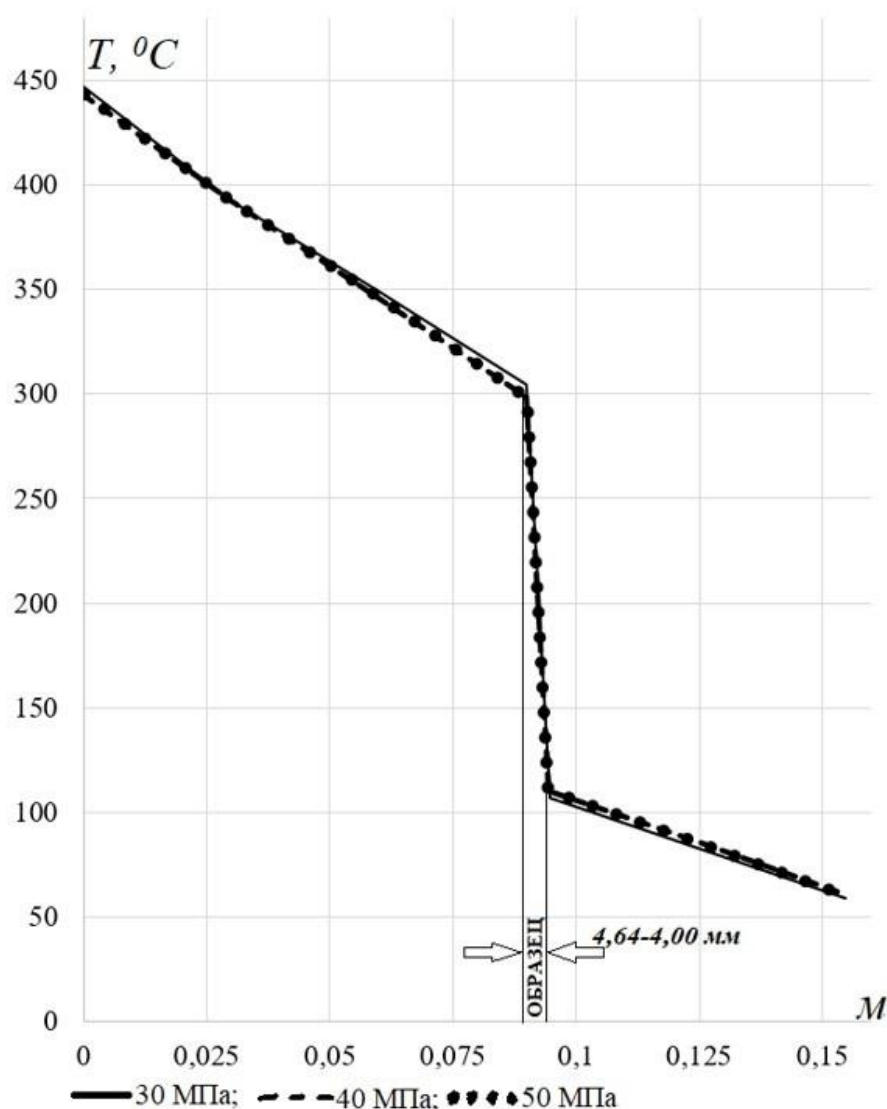


Рис. 9. График падения температуры на образце из теннисита при давлении 30–50 МПа
Fig. 9. Graph of temperature drop on a Tennisite sample at the pressure of 30–50 MPa

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный лабораторный комплекс для моделирования и исследования поведения и работы внутренней теплоизоляции новых энергоэффективных корпусов сосудов высокого давления с более высокими прочностными характеристиками на первом этапе их производства в химическом машиностроении позволяет моделировать работу сыпучих неметаллических теплоизоляционных материалов под высоким давлением.

Результаты тестирования показывают работоспособность лабораторного комплекса и эффективность моделирования работы теплозащиты на примере материала «теннисит».

Существует возможность гибкой регулировки параметров теплового поля (изменения до необходимого значения вручную), что позволяет эмитировать температуру внутренней среды (реакционного или технологического пространства внутри какого-либо оборудования) и управлять ей как целевым параметром [1, 34]. После перехода системы в состояние стационарного теплового поля определяется теплопроводность исследуемого материала. Таким образом, становится возможной оценка эффективности теплозащитных характеристик исследуемого под высоким давлением материала.

Список источников

1. Еловенко Д.А. Перспективные направления развития автоклавов высокого давления // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2010. № 1. С. 277–279.
2. Пимштейн П.Г., Еловенко Д.А. Исследование под давлением оболочки со встроенными в стенку нагревательными элементами и слоем теплоизоляционного материала // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 4. С. 17–22.
3. Elovenko D., Kräusel V. The study of thermal conductivity of asbestos cardboard and fire clay powder to assess the possibility of their application in prefabricated structures of cylindrical housings of pressure vessels // Materials Today: Proceedings. 2019. Vol. 19. Part 5. P. 2389–2395. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.041>.
4. Graf A., Elovenko D., Kräusel V., Hirsch A. Mathematic model for describing the stress-tension behavior of an autoclave with integrated heating element // Technologies for Lightweight Structures. 2018. Vol. 2. Iss. 1. P. 1–13. <https://doi.org/10.21935/tls.v2i1.108>.
5. Song Mingda, Wang Weiqiang, Zhao Yafan, Cui Yuliang. Urea reactor integrity evaluation based on failure analysis // Journal of Pressure Vessel Technology. 2007. Vol. 129. Iss. 4. P. 744–753. <https://doi.org/10.1115/1.2767368>.
6. Wang Weiqiang, Aiju Li, Zhu Yanyong, Yao Xiaojing. The explosion reason analysis of urea reactor of Pingyin // Engineering Failure Analysis. 2009. Vol. 16. Iss. 3. P. 972–986. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.08.006>.
7. Xu Shugen, Wang Weiqiang, Li Mengli, Song Mingda. A modified weld structure of layered urea reactor based on stress analysis and leak detection // Pressure Vessels and Piping Conference (Washington 18–22 July 2010). Washington, 2010. P. 557–562. <https://doi.org/10.1115/PVP2010-25225>.
8. Zheng Jianjun, Han Kuo, Wang Yingjun, Shi Xianda. Breaking cause analysis on a 110 kV overhead grounding wire (OGW) // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1550. P. 032098. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1550/3/032098>.
9. Song Mingda, Wang Weiqiang, Cao Huaixiang, Wang Lixin, Zhang Bo. Multilayer urea reactor safety evaluation based on acoustic emission examination // Pressure Vessels and Piping Conference (Toronto, 15–19 July 2012). Toronto, 2012. P. 515–524. <https://doi.org/10.1115/PVP2012-78135>.
10. Cao Huai Xiang, Wang Chun Mao, Qiu Xing Qi. Analysis on backside cracks in 316LMod inner linings of urea reactors // Applied Mechanics and Materials. 2012. Vol. 184–185. P. 858–863. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.184-185.858>.
11. Xu Shugen, Wang Chong, Zhao Yanling. Residual stress in the welding joint of layered cylindrical vessels including the weld clad effect // Journal of Pressure Vessel Technology. 2015. Vol. 137. Iss. 4. P. 041405. <https://doi.org/10.1115/1.4028726>.
12. Zheng J.Y., Deng G.D., Chen Y.J., Sun G.Y., Hu Y.L., Zhao L.M., et al. Experimental investigation of discrete multilayered vessels under internal explosion // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2006. Vol. 42. Iss. 5. P. 617–622.
13. Kovaleva I.V., Korablev I.V., Azima Yu.I. A nonstationary method and experimental equipment for measuring the thermal conductivity of heat insulators // Measurement Techniques. 2005. Vol. 48. Iss. 8. P. 789–797. <https://doi.org/10.1007/s11018-005-0222-x>.
14. Пат. № 2289126, Российская Федерация, G01N 25/32. Установка для исследования теплопроводности теплоизоляционных материалов / М.М. Пеньков, М.В. Ведерников, И.В. Наумчик; заявитель и патентообладатель Министерство обороны Российской Федерации, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. Заявл. 18.04.2005; опубл. 10.12.2006.
15. Barth G., Gross U., Wulf R. A new panel test facility for effective thermal conductivity measurements up to 1650°C // International Journal of Thermophysics. 2007. Vol. 28. Iss. 5. P. 1668–1678. <https://doi.org/10.1007/s10765-007-0272-1>.
16. Марюшин Л.А., Сенникова О.Б., Курочкин И.А. Экспериментальное исследование теплопроводности пористых теплоизоляционных материалов // Известия Московского государственного индустриального университета. 2009. № 4. С. 29–34.
17. Падерин Л.Я., Прусов Б.В., Токарев О.Д. Исследование теплопроводности пористых теплоизоляционных материалов при высоких температурах // Ученые записки ЦАГИ. 2011. Vol. 42. № 4. С. 77–83.
18. Желобцов Е.А., Исакаев Э.Х., Пелецкий В.Э., Тюфтяев А.С. Метод исследования теплопроводности конструкционных материалов и экспериментальная установка // Перспективные материалы. 2009. № 6. С. 98–102.
19. Исаев Г.Ю., Сучков А.Ф. Установка для исследования многослойных преград из огнеупорных и теплоизоляционных материалов // Современные материалы, техника и технология: матер. II Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 25 декабря 2012 г.). Москва, 2012. С. 125–128.
20. Селезнев Н.П., Чернов В.В., Сучков А.Ф. Разработка новых лабораторных установок на кафедре теплофизики и экологии МГВМИ // Современные автомобильные материалы и технологии (Саммит-2011): сб. статей III Междунар. науч.-техн. конф. (г. Курск, ноябрь, 2011 г.). Курск: Юго-Зап. гос. ун-т., 2011. С. 118–121.
21. Танганов Б.Б., Багаева Т.В., Бубеева И.А., Ханхасаев Г.Ф., Гармаев В.Ч. Чувствительная установка для измерения теплопроводности строительных и сыпучих материалов, тары и упаковок // Вестник Бурятского государственного университета. 2012. № 3. С. 131–134.
22. Савинов А.С. Установка по определению теплопроводности литейной формы // Литейные процессы. 2014. № 13. С. 68–71.
23. Рогов И.В., Полунина Н.Ю., Рожков А.В., Жуков Н.П. Измерительная система на базе прибора ИТ-3 для исследования теплопроводности материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 8. С. 31–34.

24. Ren C., Yang X., Li C., Sun Y., Liu Z. Modeling of the heat transfer characteristics of the effective thermal conductivity test facility for high temperature gas-cooled reactors // *Journal of Tsinghua University*. 2015. Vol. 55. Iss. 9. P. 991–997.

25. Cherepanov V.Y., Lozinskaya O.M., Rybak N.I., Yamshanov V.A. Measuring equipment and a comparator for measuring high values of thermal conductivity // *Measurement techniques*. 2009. Vol. 52. Iss. 10. P. 1107–1111. <https://doi.org/10.1007/s11018-010-9403-3>.

26. Bol'shev K.N., Zarichnyak Y.P., Ivanov V.A. Determination of thermal conductivity by the method of the initial stage of warming up a sample by a constant heat flux // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2018. Vol. 91. Iss. 5. P. 1342–1346. <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1867-z>.

27. Blázquez C.S., Martín A.F., Nieto I.M., González-Aguilera D. Measuring of thermal conductivities of soils and rocks to be used in the calculation of a geothermal installation // *Energies*. 2017. Vol. 10. Iss. 6. P. 795. <https://doi.org/10.3390/en10060795>.

28. Вертоградский В.А., Попов Ю.А., Миклашевский Д.Е. Метод и установка для измерений теплопроводности горных пород при высоких давлениях и температурах // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2003. № 5. С. 47–51.

29. Shishkina R.A., Zemlyanskaya A.P., Beketov A.R.

High performance thermal grease with aluminum nitride filler and an installation for thermal conductivity investigation // *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 284. P. 48–53. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.284.48>.

30. Пат. № 2783366, Российская Федерация, G01N 25/18, G01N 25/32, G01N 3/18. Установка для определения теплопроводности материалов под давлением / Д.А. Еловенко, П.Г. Пимштейн, К.А. Кузнецов; заявитель и патентообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет. Заявл. 16.02.2022; опубл. 11.11.2022.

31. Барсук Е.Г., Пимштейн П.Г., Жукова В.Н. Определение контактной теплопроводности листового проката // *Заводская лаборатория*. 1972. № 3. С. 305–306.

32. Станкус С.В., Савченко И.В., Багинской А.В., Верба О.И., Прокопьев А.М., Хайрулин Р.А. Коэффициенты теплопроводности нержавеющей стали 12Х18Н10Т в широком интервале температур // *Теплофизика высоких температур*. 2008. Т. 46. № 5. С. 795–797. <https://doi.org/10.1134/S0018151X08050222>.

33. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи: 2-е изд. М.: Энергия, 1977. 344 с.

34. Еловенко Д.А., Пимштейн П.Г., Репецкий О.В., Татаринов Д.В. Экспериментальное исследование модели автоклава для гидротермального синтеза минералов // *Вестник Байкальского союза стипендиатов DAAD*. 2010. № 1. С. 11–19.

References

1. Elovenco D.A. Future directions of the development of high-pressure autoclaves. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2010;1:277-279. (In Russ.).

2. Pimshtein P.G., Elovenco D.A., Tatarinov A.D. The research of enclosure under pressure with heating element installed in wall with heat insulation material layer. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie = Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2011;4:17-22. (In Russ.).

3. Elovenco D., Kräusel V. The study of thermal conductivity of asbestos cardboard and fire clay powder to assess the possibility of their application in prefabricated structures of cylindrical housings of pressure vessels. *Materials Today: Proceedings*. 2019;19(5):2389-2395. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.041>.

4. Graf A., Elovenco D., Kräusel V., Hirsch A. Mathematic model for describing the stress-tension behavior of an autoclave with integrated heating element. *Technologies for Lightweight Structures*. 2018;2(1):1-13. <https://doi.org/10.21935/tls.v2i1.108>.

5. Song Mingda, Wang Weiqiang, Zhao Yafan, Cui Yuliang. Urea reactor integrity evaluation based on failure analysis. *Journal of Pressure Vessel Technology*. 2007;129(4):744-753. <https://doi.org/10.1115/1.2767368>.

6. Wang Weiqiang, Aiju Li, Zhu Yanyong, Yao Xiaojing. The explosion reason analysis of urea reactor of Pingyin. *Engineering Failure Analysis*. 2009;16(3):972-986.

<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.08.006>.

7. Xu Shugen, Wang Weiqiang, Li Mengli, Song Mingda. A modified weld structure of layered urea reactor based on stress analysis and leak detection. In: *Pressure Vessels and Piping Conference*. 18–22 July 2010, Washington. Washington; 2010, p. 557-562. <https://doi.org/10.1115/PVP2010-25225>.

8. Zheng Jianjun, Han Kuo, Wang Yingjun, Shi Xianda. Breaking cause analysis on a 110 kV overhead grounding wire (OGW). *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1550:032098. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1550/3/032098>.

9. Song Mingda, Wang Weiqiang, Cao Huaixiang, Wang Lixin, Zhang Bo. Multilayer urea reactor safety evaluation based on acoustic emission examination. In: *Pressure Vessels and Piping Conference*. 15–19 July 2012, Toronto. Toronto; 2012, p. 515-524. <https://doi.org/10.1115/PVP2012-78135>.

10. Cao Huai Xiang, Wang Chun Mao, Qiu Xing Qi. Analysis on backside cracks in 316LMod inner linings of urea reactors. *Applied Mechanics and Materials*. 2012;184-185:858-863. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.184-185.858>.

11. Xu Shugen, Wang Chong, Zhao Yanling. Residual stress in the welding joint of layered cylindrical vessels including the weld clad effect. *Journal of Pressure Vessel Technology*. 2015;137(4):041405. <https://doi.org/10.1115/1.4028726>.

12. Zheng J.Y., Deng G.D., Chen Y.J., Sun G.Y., Hu Y.L.,

- Zhao L.M., et al. Experimental investigation of discrete multilayered vessels under internal explosion. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2006;42(5):617-622.
13. Kovaleva I.V., Korablev I.V., Azima Yu.I. A nonstationary method and experimental equipment for measuring the thermal conductivity of heat insulators. *Measurement Techniques*. 2005;48(8):789-797.
<https://doi.org/10.1007/s11018-005-0222-x>.
14. Pen'kov M.M., Vedernikov M.V., Naumchik I.V. *An installation to study thermal conductivity of heat-insulating materials*. Patent RF, no. 2289126; 2006. (In Russ.).
15. Barth G., Gross U., Wulf R. A new panel test facility for effective thermal conductivity measurements up to 1650°C. *International Journal of Thermophysics*. 2007;28(5):1668-1678. <https://doi.org/10.1007/s10765-007-0272-1>.
16. Maryushin L.A., Sennikova O.B., Kurochkin I.A. Experimental study of thermal conductivity of porous heat-insulating materials. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta = Proceedings of Moscow State Industrial University*. 2009;4:29-34. (In Russ.).
17. Paderin L.Ya., Prusov B.V., Tokarev O.D. Investigation of heat conductivity of porous thermal insulation materials at high temperatures. *Uchenye zapiski CAGI*. 2011;42(4):77-83. (In Russ.).
18. Zhelobtsov E.A., Isakaev E.H., Peleckij V.E., Tyuftayev A.S. A method and experimental installation for studying structural material thermal conductivity. *Journal Perspektivnye materialy*. 2009;6:98-102. (In Russ.).
19. Isaev G.Yu., Suchkov A.F. An installation for studying multilayer barriers from refractory and heat-insulating materials. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologiya: materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Modern materials, equipment and technology: materials of the 2nd International scientific and practical conference*. 25 December 2012, Moscow. Moscow, 2012, p. 125-128. (In Russ.).
20. Seleznev N.P., Chernov V.V., Suchkov A.F. Development of new laboratory facilities at the Department of Thermal Physics and Ecology of the Moscow State Evening Metallurgical Institute. *Sovremennye avtomobil'nye materialy i tekhnologii (Sammit-2011): sbornik statej III Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Modern Automotive Materials and Technologies (Summit-2011): collection of articles of the 3^d International scientific and technical conference*. November 2011, Kursk. Kursk: Southwest State University; 2011, p. 118-121. (In Russ.).
21. Tanganov B.B., Bagaeva T.V., Bubeeva I.A., Khankhasaev G.F., Garmaev V.Ch-D. Sensitive plant for measurement of thermal conductivity of building and loose materials, packaging and packing. *Vestnik Bur'yatskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2012;3:131-134. (In Russ.).
22. Savinov A.S. Installation for determining casting mold thermal conductivity. *Litejnye processy*. 2014;13:68-71. (In Russ.).
23. Rogov I.V., Polunina N.Yu., Rozhkov A.V., Zhukov N.P. Measuring system based on an IT-3 device used to study the thermal conductivity of materials. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2015;81(8):31-34. (In Russ.).
24. Ren C., Yang X., Li C., Sun Y., Liu Z. Modeling of the heat transfer characteristics of the effective thermal conductivity test facility for high temperature gas-cooled reactors. *Journal of Tsinghua University*. 2015;55(9):991-997.
25. Cherepanov V.Y., Lozinskaya O.M., Rybak N.I., Yamshanov V.A. Measuring equipment and a comparator for measuring high values of thermal conductivity. *Measurement techniques*. 2009;52(10):1107-1111.
<https://doi.org/10.1007/s11018-010-9403-3>.
26. Bol'shev K.N., Zarichnyak Y.P., Ivanov V.A. Determination of thermal conductivity by the method of the initial stage of warming up a sample by a constant heat flux. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2018;91(5):1342-1346. <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1867-z>.
27. Blázquez C.S., Martín A.F., Nieto I.M., González-Aguilera D. Measuring of thermal conductivities of soils and rocks to be used in the calculation of a geothermal installation. *Energies*. 2017;10(6):795.
<https://doi.org/10.3390/en10060795>.
28. Vertogradskij V.A., Popov Yu.A., Miklashevskij D.E. Method and installation for measuring rock thermal conductivity at high pressures and temperatures. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Geologiya i razvedka = Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2003;5:47-51. (In Russ.).
29. Shishkina R.A., Zemlyanskaya A.P., Beketov A.R. High performance thermal grease with aluminum nitride filler and an installation for thermal conductivity investigation. *Solid State Phenomena*. 2018;284:48-53.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.284.48>.
30. Yakovenko D.A., Pimshtein P.G., Kuznetsov K.A. *Installation for determining the thermal conductivity of materials under pressure*. Patent RF, no. 2783366; 2022. (In Russ.).
31. Barsuk E.G., Pimshtejn P.G., Zhukova V.N. Determination of the contact thermal conductivity of sheet metal. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 1972;3:305-306. (In Russ.).
32. Stankus S.V., Savchenko I.V., Baginskii A.V., Verba O.I., Prokop'ev A.M., Khairulin R.A. Thermal conductivity coefficients of 12H18N10T stainless steel in a wide temperature range. *Teplofizika vysokih temperature = High Temperature*. 2008;46(5):795-797.
<https://doi.org/10.1134/S0018151X08050222>.
33. Miheev M.A., Miheeva I.M. *Fundamentals of heat transfer*. Moscow: Energiya; 1977, 344 p. (In Russ.).
34. Elovenko D.A., Pimshtejn P.G., Repeckij O.V., Tatari-nov D.V. Experimental study of a pressure vessel model for hydrothermal synthesis of minerals. *Vestnik Bajkal'skogo soyuza stipendiatov DAAD*. 2010;1:11-19. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**Еловенко Денис Александрович,**

к.т.н., доцент,
доцент кафедры конструирования и стандартизации в
машиностроении,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
✉ elovenko03@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6520-9268>

Пимштейн Павел Гдальевич,

д.т.н., профессор,
ведущий научный сотрудник отдела оборудования
для химической, нефтехимической,
нефтегазоперерабатывающей и других отраслей
промышленности,
ИркутскНИИхиммаш,
664074, г. Иркутск, ул. Академика Курчатова, 3,
Россия
pim1937@mail.ru

Кузнецов Кирилл Анатольевич,

к.т.н.,
первый заместитель генерального директора,
ИркутскНИИхиммаш,
664074, г. Иркутск, ул. Академика Курчатова, 3,
Россия
k.kuznetsov@hm.irk.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 20.04.2022; одобрена после рецензирования 31.08.2022; принята к публикации 11.01.2023.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**Denis A. Elovenko,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Design
and Standardization in Mechanical Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
✉ elovenko03@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6520-9268>

Pavel G. Pimshtein,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Leading Researcher of the Department of Equipment
for Chemical, Petrochemical, Oil and Gas Processing
and other Industries,
JSC IrkutskNIHimmash,
3, Akademika Kurchatova St., Irkutsk 664074, Russia
pim1937@mail.ru

Kirill A. Kuznetsov,

Cand. Sci. (Eng.), First Deputy Director General,
JSC IrkutskNIHimmash,
3, Akademika Kurchatova St., Irkutsk 664074, Russia
k.kuznetsov@hm.irk.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 20.04.2022; approved after reviewing 31.08.2022; accepted for publication 11.01.2023.