

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВСКРЫТИЯ ТЕЧЕЙ В СВАРНОМ ШВЕ ЗАМКНУТОЙ ЁМКОСТИ ПРИ ТЕПЛОВОМ И АКУСТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

И. Ю. Лесняк

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

Для проведения экспериментальных исследований процесса осушки замкнутой ёмкости с учетом вскрытия канала течи в сварном шве спроектированы и изготовлены экспериментальный исследовательский стенд, экспериментальная ёмкость и экспериментальные образцы с модельными течами разного размера. Сформулирована научная проблема экспериментальных исследований, разработаны программа и методики проведения экспериментов. Сформированы требования к метрологическому оборудованию и определена погрешность измерений температуры, влажности и давления. Проведены предварительные эксперименты по смачиванию экспериментальной ёмкости и экспериментальных образцов модельной жидкостью и закупориванию каналов течи, а также по осушке внутренней поверхности стенки экспериментальной ёмкости конвективным потоком газа и кондуктивным нагревом стенки до момента вскрытия закупоренных жидкостью каналов течи. Получены зависимости изменения температуры жидкости, воздуха, стенки экспериментальной ёмкости, экспериментальных образцов и давления в экспериментальной ёмкости по времени проведения эксперимента при смачивании и осушке экспериментальной ёмкости и экспериментальных образцов. Определены параметры теплового воздействия, при которых происходит вскрытие каналов течи за установленное время.

Ключевые слова: канал течи, осушка ёмкости, эксперимент, ультразвук, пониженное давление, капилляр.

Введение

При изготовлении баков ракет-носителей (РН) с жидкостными ракетными двигателями ряд технологических операций предполагает заполнение внутреннего объема бака РН рабочей технической жидкостью, например, водой, водными растворами или органическими растворителями. В соответствии с ОСТ 92-0019-78 «Методы и режимы сушки изделий перед испытаниями на герметичность» [1] к таким технологическим операциям относятся: гидравлические испытания, мойка, тарировка, пролив, химическая обработка и др. Удаление жидкости с наружной и внутренней поверхности бака РН и из труднодоступных мест перед испытаниями на герметичность рекомендуется осуществлять путем протирки сухими салфетками, продувкой сухим воздухом и осушкой. Осушка бака РН в соответствии с [1] с целью удаления влаги из каналов течей (капилляров), которые могут находиться в сварных швах, осуществляют различными методами, например, конвективным, температурным, температурно-вакуумным, инфракрасным и комбинированным. При этом продолжительность осушки баков РН одним из перечисленных выше методов зависит от типа бака РН, толщины стенки (условной длины канала течи), длительности контакта с жидкостью при смачивании и температуры нагрева.

Поскольку продолжительность осушки баков РН в условиях высоких температур ограничена из-за влияния на прочностные характеристики осушаемого материала [2], то используются различные температурные режимы осушки бака РН, которые

включают в себя время осушки при повышенной температуре и дополнительное время осушки при пониженной температуре. Например, общее время осушки с условной длиной канала течи 3 мм составляет 26,1 часа, из которых 1,5 часа — время осушки при повышенной температуре 85 °С, 24,6 часа — дополнительное время осушки при температуре 20 °С [1].

Одним из факторов, влияющим на время осушки, является время вскрытия канала течи, заполненного жидкостью. Вопрос о поведении испаряющейся жидкости внутри канала течи (капилляра) является активной областью исследований, поскольку часто встречается при рассмотрении функционирования тепловых трубок [3, 4], систем охлаждения электроники [5], систем подачи топлива [6], печатающих устройств [7] и т.д.

Процесс движения и испарения жидкости в капилляре экспериментально исследован в работе [3]. Рассматриваются четыре варианта течения жидкости в капилляре: кольцевое, нагнетательное, снарядное, пузырьковое. Жидкая пробка выталкивается из длинного сухого стеклянного капилляра в направлении выходного отверстия под действием нагнетаемого воздуха с одной стороны, а с другой стороны выходное отверстие в атмосферу. При этом осуществляется нагрев отдельного участка капилляра, что приводит к увеличению скорости испарения образовавшейся пленки жидкости.

В работе [8] разработана математическая модель испарения пробки жидкости при капиллярном течении между вертикальными параллельными пластинами. Исследовано влияние расстояния между

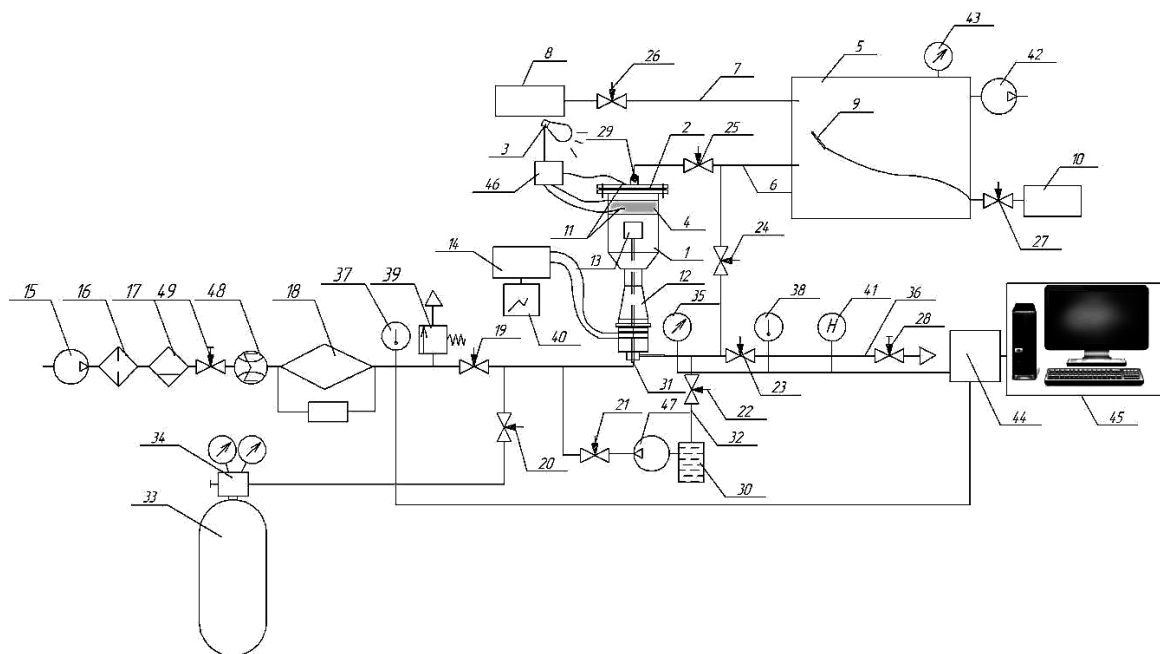


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental research stand: 1 — EC with a flange; 2 — ES with helium leak (HL); 3 — ES heater (infrared lamp); 4 — tape wall heater EC; 5 — vacuum chamber; 6, 7 — vacuum pumping lines; 8 — container with control helium leak; 9 — helium leak detector probe; 10 — spectral-mass leak detector; 11 — thermoelectric converter; 12 — piezoceramic acoustic emitter; 13 — Hartmann acoustic emitter; 14 — acoustic generator; 15 — compressor; 16 — filter; 17 — moisture-oil separator; 18 — heater with proportional-integral-differential controller; 19–27 — shut-off valve; 29 — fitting for connecting ES with a helium leak to the vacuum chamber through the pipeline of the vacuum pumping line; 30 — container with technical liquid; 31 — inlet pipe to the EC; 32 — outlet pipe for draining technical fluid; 33 — cylinder with an air-helium mixture; 34 — helium regulator (reducer); 35 — pressure sensor (pressure gauge); 36 — outlet pipe for the exit of gas from the EC; 37, 38 — temperature sensor (thermal resistance); 39 — safety valve; 40 — oscilloscope; 41 — dew point sensor (hygrometer); 42 — vacuum pump; 43 — vacuum gauge; 44 — analog-to-digital converter; 45 — personal computer; 46 — microprocessor meter-regulator; 47 — liquid pump; 48 — flow meter; 28, 49 — valve

пластинами на капиллярный поток и скорость испарения жидкости.

Для уменьшения затрат времени и энергии на осуществление процесса осушки баков РН с учетом вскрытия канала течи перед испытаниями на герметичность в условиях завода-изготовителя необходимо проведение теоретических и экспериментальных исследований процессов тепло- и массообмена, происходящих в экспериментальной ёмкости (ЭЁ) при введении новых видов воздействия на жидкость (акустический и кондуктивный), которых нет в [1] и их комбинации с существующими методами [1].

Поскольку существующие методы определения размера канала течи основаны на пропускании гелия или воздушно-гелиевой смеси (20 % гелия, 80 % воздуха) через канал течи [9], то используется термин «гелиевая течь» (ГТ). Допускаемое значение ГТ [1]: при контроле методом щупа $2,66 \cdot 10^{-8}$ Вт ($2 \cdot 10^{-4}$ л·мкм·рт.ст/с); при контроле методом вакуумирования — $6,65 \cdot 10^{-7}$ Вт ($5 \cdot 10^{-3}$ л·мкм·рт.ст/с) [10].

Научная проблема экспериментальных исследований заключается в определении коэффициентов тепло- и массоотдачи при осушке ЭЁ и вскрытии ГТ неизвестной формы, заполненной жидкостью при различных видах воздействия (вакуумное, конвективное, кондуктивное, акустическое и электромагнитное) как по отдельности, так и совместно. Найденные коэффициенты тепло- и массоотдачи позволят провести численные оценки процесса осушки ЭЁ и вскрытия ГТ, в том числе затраты времени и энергии при введении новых видов воздействия на жидкость (акустический и кондуктивный) и их комбинации с существующими методами [1].

1. Постановка задачи

Целью проведения экспериментальных исследований является получение зависимостей параметров процессов тепло- и массообмена (температура, давление, влажность, длительность процессов) по времени проведения экспериментов по вскрытию ГТ.

Таблица 1. Метрологическое оборудование, используемое при проведении экспериментов и погрешность измерений
Table 1. Metrological equipment used in experiments and measurement error

№ п/п	Контролируемый параметр	Средства измерений	Погрешность средств измерений	Диапазон измеряемых параметров
1	Температура газа на входе и на выходе из ЭЁ	Термопреобразователь сопротивления ДТС105М-50М.0,5.80.И	± 0,5 %	40–85 °С
		Измеритель сигнала с термопреобразователей сопротивления: крейт L-CARD LTR-EU-2-5-m с модулем LTR27 и submodule H-27T (АЦП)		
2	Температура ЭО и стенки ЭЁ	Преобразователь термоэлектрический ДТПК011-0,3/1,5	± 0,5 %	20–85 °С
		Измеритель-регулятор микропроцессорный 2ТРМ1-Щ1.У2.РР.РС		
3	Избыточное давление газа (жидкости) в ЭЁ	Преобразователь давления измерительный АИР-10Н	± 0,2 %	100–300 кПа
4	Относительная влажность газа в ЭЁ	Портативный измеритель относительной влажности и температуры ИВТМ-7 Н-03-ПС-2В (М16)	± 0,2 %	0,2–99 %
5	Время	Таймер компьютера	± 0,015 с	До момента вскрытия течи
6	Поток гелия	Спектрально-массовый теческатель Pfeiffer Vacuum ASM 340	Погрешность не нормируется	При вакуумном методе $5 \cdot 10^{-13}$ Па м ³ /с При методе измерения щупом $5 \cdot 10^{-10}$ Па м ³ /с

Задачи экспериментальных исследований:

- разработка основных требований для экспериментального исследовательского стенда с учетом параметров ГТ, состава метрологического оборудования и т.д.;

- разработка программы и методик проведения экспериментов;

- проведение предварительных экспериментов для настройки оборудования и отработки процесса вскрытия ГТ;

- получение зависимостей изменения параметров процессов тепло- и массообмена (температура, давление, влажность, длительности процессов) при проведении экспериментов по осушке ЭЁ и вскрытию ГТ.

2. Экспериментальный исследовательский стенд

Проведение экспериментальных исследований планируется в несколько этапов с использованием следующих экспериментальных исследовательских стендов с ЭЁ в виде:

- замкнутого цилиндра с установленным экспериментальным образцом (ЭО) со сварным швом, имеющим ГТ с размерами, соответствующими размерам ГТ в сварном шве бака РН;

- уменьшенного макета бака РН, созданного с учетом теории подобия, в стенке которого имеется сварной шов с ГТ;

- реального бака РН со сварным швом с ГТ.

Экспериментальный исследовательский стенд для моделирования процессов тепло- и массообмена должен обеспечить:

- возможность смачивания внутренней поверхности стенки ЭЁ и заполнения ГТ;

- возможность подачи различных видов энергии к жидкости, находящейся на внутренней стенке ЭЁ и в ГТ при тепловом (конвективный, кондуктивный, электромагнитный), акустическом и вакуумном воздействиях;

- наличие в конструкции ЭЁ сварного шва с ГТ, установленного размера, больше допускаемого значения [1];

- определение параметров процессов тепло- и массообмена по времени проведения экспериментов (температура стенки ЭЁ и газа в объеме ЭЁ; давление в ЭЁ; относительная влажность газа в ЭЁ; расход гелия или воздушно-гелиевой смеси через ГТ).

В соответствии с поставленными целями, задачами и требованиями к экспериментальному исследовательскому стенду разработана его принципиальная схема (рис. 1), в состав которой входит оборудование, позволяющее проводить исследования процессов тепло- и массообмена при осушке ЭЁ и вскрытии ГТ в условиях многофакторного воздействия:

- а) акустическое (пьезокерамический акустический излучатель (12); акустический излучатель Гармана (13));

- б) тепловое:

- конвективное (компрессор (15), нагреватель с пропорционально-интегрально-дифференциальным регулятором (18));

- кондуктивное (ленточный нагреватель стенки ЭЁ (4));

- электромагнитное (инфракрасная лампа (3));

- в) вакуумное (вакуумная камера (5), вакуумный насос (42)).

Метрологическое оборудование выбрано из условия определения параметров исследуемого процесса (температура участников теплообмена, давление газа, относительная влажность газа, поток гелия), необходимых для расчета коэффициентов тепло- и массоотдачи [11] и подтверждения факта вскрытия ГТ.

В табл. 1 приведено метрологическое оборудование, используемое при проведении экспериментов и погрешности измерений.

На рис. 2 показан созданный экспериментальный исследовательский стенд.



Рис. 2. Экспериментальный исследовательский стенд: 1 — стойка с ЭЁ, акустическими излучателями и метрологическим оборудованием; 2 — стойка с системой подготовки теплоносителя (газа) и системой подачи жидкости в ЭЁ; 3 — рампа баллонная с установленными баллонами с азотом и гелием

Fig. 2. Experimental research stand: 1 — rack with EC, acoustic emitters and metrological equipment; 2 — rack with a coolant (gas) preparation system and a liquid supply system to the EC; 3 — balloon ramp with installed nitrogen and helium cylinders



а) б)
Рис. 3. ЭО со сварным швом с ГТ
Fig. 3. ES with welded seam with HL

На рис. 3 показан один из изготовленных ЭО с несколькими ГТ, расположенными в неизвестной области сварного шва в виде сквозных микроканалов неопределенной формы и размера.

На рис. 3б показан ЭО, установленный на ЭЁ с помощью фланцевого соединения. В качестве материала, из которого изготовлены ЭЁ и ЭО, выбран АМг6, аналогичный материалу осушаемого бака РН.

Поскольку форма, размер и количество ГТ неизвестны и переменны по толщине и длине сварного шва в ЭО, то размер ГТ определяется по величине потока гелия или воздушно-гелиевой смеси с единицами измерения — мощность (Вт) или объем-давление в единицу времени ($\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$; $\text{л} \cdot \text{ммк} \cdot \text{рт.ст} / \text{с}$) [10].

3. Программа и методики проведения экспериментов

Все эксперименты разделяются на:

1. Эксперименты для отработки отдельных систем экспериментального исследовательского стенда (система смачивания внутренней поверхности стенки ЭЁ и заполнения жидкостью ГТ; система подачи теплоносителя (очищенный и осушенный

воздух) в ЭЁ; система нагрева стенки ЭЁ ленточным нагревателем; система подачи гелия или воздушно-гелиевой смеси в ЭЁ с ГТ; система создания пониженного давления; система создания акустических колебаний; система создания инфракрасного излучения) и метрологического оборудования (датчики температуры, массового-секундного расхода, давления, влажности, аналого-цифровой преобразователь).

2. Основные эксперименты для исследования процессов тепло- и массообмена при осушке внутренней поверхности ЭЁ и вскрытии ГТ разного размера в условиях теплового, акустического, вакуумного и комбинированного воздействий.

Виды воздействия на жидкость, расположенной на стенках ЭЁ и в ГТ после смачивания внутренней поверхности ЭЁ:

1. Тепловое воздействие за счет использования:
 - конвективного потока газа, подаваемого во внутренний объем ЭЁ;
 - электромагнитного (инфракрасного) излучения на внешнюю поверхность ЭО;
 - кондуктивного нагрева стенки ЭЁ с внешней стороны.
2. Акустическое воздействие за счет использования:

- модулированного потока газа при его прохождении через газоструйный излучатель Гартмана, установленный на входном патрубке внутри ЭЁ;
- пьезокерамического излучателя, установленного на внешней поверхности стенки ЭЁ;

3. Вакуумное воздействие за счет создания пониженного давления как с одной стороны ЭО, так и с двух сторон ЭО.

4. Комбинированное воздействие.

Предварительно выбирается количество повторений каждого эксперимента не менее трех раз. После проведения многократных экспериментов проводится обработка результатов измерений согласно ГОСТ Р 8.736-2011 [12], выявляются и исключаются систематические и грубые погрешности измерений.

Для получения результатов экспериментов в пределах доверительных границ после обработки полученных экспериментальных данных проводится оценка необходимого количества повторений каждого эксперимента в соответствии с ГОСТ 24026-80 [13] и методикой, изложенной в [14].

Прекращение эксперимента по осушке ЭЁ и вскрытию ГТ происходит после установленного времени или при выполнении следующих условий:

- значение относительной влажности газа на выходе из ЭЁ соответствует значению относительной влажности газа на входе в ЭЁ;
- регистрируемый поток гелия или воздушно-гелиевой смеси соответствует выбранной ГТ;
- появление пузырьков газа в объеме спиртовой смеси, расположенной на поверхности ЭО со сварным швом.

Методика 1: проведение экспериментов по смачиванию жидкостью внутренней поверхности экспериментальной ёмкости и закупориванию гелиевой течи.

В соответствии с принципиальной схемой экспериментального исследовательского стенда, представленной на рис. 1, перед началом проведения эксперимента выбирается один из трех ЭО 2 с ГТ (рис. 3а) и закрепляется на ЭЁ 1 с помощью болтов фланцевого соединения (рис. 3б). Три вида ЭО 2 отличаются друг от друга размерами ГТ.

Перед началом проведения экспериментов все клапаны и вентили закрыты. Осуществляется залив жидкости в ЭЁ 1 для смачивания стенок ЭЁ 1 и заполнения жидкостью ГТ в ЭО 2. Для этого открываются клапаны 21, 22 и включается жидкостный насос 47. Жидкость подается в ЭЁ 1 из ёмкости 30 через входной патрубок 31. Слив жидкости осуществляется обратно в ёмкость 30 через выходной патрубок 32. При этом с помощью датчиков давления 35 и преобразователей термоэлектрических (термопары) 11 с измерителем-регулятором микропроцессорным 46 измеряются давление жидкости в ЭЁ и температуры стенки ЭЁ 1 и ЭО 2. Время смачивания внутренней поверхности ЭЁ 1 и заполнения ГТ жидкостью определяется в результате численных экспериментов. На данном этапе исследований продолжительность смачивания составляет 60 секунд. После этого закрываются клапаны 21 и 22.

Полученные результаты экспериментов в виде значений давления жидкости в ЭЁ 1 и температуры стенки ЭЁ 1 и ЭО 2 обрабатываются в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 [12] и в дальнейшем используются для определения коэффициентов тепло- и массоотдачи [11], необходимых для проведения численных экспериментов по определению времени смачивания поверхности ЭЁ 1 и заполнения жидкостью ГТ.

Методика 2: проведение экспериментов по осушке внутренней поверхности экспериментальной ёмкости и вскрытию гелиевой течи.

При проведении экспериментов предполагается постоянное конвективное воздействие потока горячего очищенного и осушенного газа на жидкость, расположенную на стенках ЭЁ 1 и в ГТ совместно с одним или несколькими дополнительными видами воздействия (кондуктивный, акустический, вакуумный, инфракрасный).

При выборе дополнительного акустического воздействия устанавливается акустическая система в виде газоструйного излучателя Гартмана 13 на входной патрубок внутри ЭЁ 1 и (или) пьезокерамический акустический излучатель 12 на корпусе ЭЁ 1, подключенный к акустическому генератору 14.

При выборе дополнительного вакуумного воздействия на фланец ЭЁ 1 устанавливается ответный фланец со штуцером 29, который соединяется с вакуумной камерой 5 с помощью магистрали вакуумной откачки 6. Ёмкость с контрольной гелиевой течью 8 соединяется с вакуумной камерой 5 с помощью магистрали вакуумной откачки 7. Щуп 9 спектрально-массового течеискателя 10 устанавливается на заданном расстоянии от выходных концов магистралей вакуумной откачки 6 и 7, расположенных в вакуумной камере 5. При проведении экспериментов без вакуумного воздействия щуп 9 устанавливается непосредственно возле сварного шва ЭО 2.

При выборе дополнительного теплового воздействия на стенку ЭЁ 1 и ЭО 2 осуществляется подключение инфракрасной лампы 3 и (или) ленточного нагревателя 4. С помощью измерителя-регулятора микропроцессорного 46 осуществляется включение и выключение инфракрасной лампы 3 и нагревателя 4 при заданных значениях температуры нагрева ЭО 2 и стенки ЭЁ 1.

Для подачи нагретого газа в ЭЁ 1 включается компрессор 15 и открываются клапаны 19, 23 и вентиль 28. Фильтрация и осушка газа осуществляется

с помощью установленных после компрессора 15 фильтра 16 и влагомаслоотделителя 17. С помощью вентилей 49 и расходомера 48 устанавливается необходимый расход газа, подаваемого в ЭЁ 1. Избыточное давление в ЭЁ 1 устанавливается за счет регулирования расхода газа на входе в ЭЁ 1 с помощью вентилей 49 и на выходе из ЭЁ 1 с помощью вентилей 28, установленного на выходном патрубке 36. Давление в ЭЁ 1 определяется с помощью манометра 35, установленного на выходном патрубке ЭЁ 1. Нагрев газа до заданной температуры осуществляется нагревателем с пропорционально-интегрально-дифференциальным регулятором 18. Температура газа на входе и на выходе из ЭЁ 1 определяется с помощью датчиков температуры 37 и 38. Влажность газа на выходе из ЭЁ 1 определяется с помощью гигрометра 41. При превышении установленного давления в системе срабатывает предохранительный клапан 39.

При использовании пьезокерамического акустического излучателя 12 с помощью акустического генератора 14 и осциллографа 40 устанавливается необходимая амплитуда колебаний стенок ЭЁ 1.

Проведение экспериментов при пониженном давлении возможно в условиях общего или одностороннего вакуумирования. Общее вакуумирование осуществляется за счет открытия клапанов 24 и 25. Одностороннее вакуумирование осуществляется при открытии одного из клапанов 24 или 25 в зависимости от стороны ЭО 2, с которой необходимо создать пониженное давление. Не допускается конвективная подача газа в ЭЁ 1 из компрессора 15 при условии общего вакуумирования или одностороннего вакуумирования внутри ЭЁ 1.

Для обеспечения пониженного давления в системе, перед открытием клапанов 24 и 25 включается вакуумный насос 42, при этом давление в вакуумной камере 5 определяется с помощью вакуумметра 43. При достижении необходимого давления в вакуумной камере 5 вакуумный насос 42 выключается.

После осушки ЭЁ 1 и ЭО 2 с ГТ одним из способов или комбинацией способов осуществляется проверка факта вскрытия ГТ. Для этого закрываются все клапаны и вентили, включается спектрально-массовый течеискатель 10. Открываются клапаны 20, 25 и 27. С помощью регулятора гелиевого 34 устанавливается необходимое давление гелия или воздушно-гелиевой смеси, которая подается в ЭЁ 1 из баллона 33. По показаниям спектрально-массового течеискателя 10 делается вывод о вскрытии ГТ.

Ёмкость с контрольной гелиевой течью 8 необходима для настройки, проверки работоспособности спектрально-массового течеискателя 10 и сравнения расхода гелия или воздушно-гелиевой смеси из ГТ ЭО 2 и контрольной гелиевой течи 8. Для этого закрывается клапан 25, открывается клапан 26, и гелий или воздушно-гелиевая смесь из контрольной гелиевой течи 8 поступает в вакуумную камеру 5.

Информация с термопар 11, датчиков температуры 37, 38, давления 35 и точки росы 41 поступает через аналого-цифровой преобразователь 44 на персональный компьютер 45 для регистрации и обработки полученных результатов.

При проведении предварительных экспериментов без спектрально-массового течеискателя 10 сварной шов в ЭО 2 заливается спиртовой смесью в отверстие фланцевого соединения (рис. 3б) для подтверждения факта вскрытия ГТ. При вскрытии ГТ в объеме спиртовой смеси появляются всплыва-

ющие пузырьки газа (воздух, гелий или воздушно-гелиевая смесь), эксперимент прекращается и делается вывод о том, что ГТ вскрыта. Такой способ позволяет получить только качественную картину исследуемого процесса. Количественные характеристики (расход гелия) возможно получить с помощью спектрально-массового течейскалителя 10.

В результате проведенных экспериментов определяются значения влажности газа на выходе из ЭЁ 1, давление газа в ЭЁ 1, температуры стенки ЭЁ 1, ЭО 2, газа на входе и на выходе из ЭЁ 1 и потока гелия из ГТ.

Полученные результаты обрабатываются в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 [12] и в дальнейшем используются для определения коэффициентов тепло- и массоотдачи [11], необходимых для проведения численных экспериментов по определению затрат энергии и времени на осушку внутренней поверхности ЭЁ 1 и вскрытия ГТ.

Исходные данные для проведения предварительных экспериментов по смачиванию жидкостью внутренней поверхности ЭЁ и закупориванию ГТ и их осушки: размер ГТ: $2 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3}$ л·мкм·рт.ст/с; температура теплоносителя (воздуха): 20 °С; 40 °С; 60 °С; массовый-секундный расход воздуха: 80 л/мин – 200 л/мин; избыточное давление в ЭЁ: 100 кПа; 200 кПа; 300 кПа; температура нагрева стенки ЭЁ ленточным нагревателем 50 °С; время проведения эксперимента по осушке ЭЁ: 600 с; время проведения эксперимента по смачиванию внутренней поверхности ЭЁ и закупориванию ГТ жидкостью: 60 с; жидкость для смачивания: дистиллированная вода.

4. Результаты предварительных экспериментов

4.1. Эксперименты по смачиванию жидкостью внутренней поверхности экспериментальной ёмкости и закупориванию гелиевой течи по методике 1.

Эксперименты проводились при подаче жидкости (дистиллированной воды) в ЭЁ в течение 60 с. За это время при производительности насоса НБЦ-380 0,2 л/с через ЭЁ прошло 12 литров воды.

В результате проведенных экспериментов получены графики изменения температуры стенки ЭЁ, ЭО и давления жидкости внутри ЭЁ при подаче жидкости в ЭЁ (рис. 4).

На рис. 4 (график 3) видно, что при включении насоса на 6,5 секунде происходит увеличение давления жидкости в ЭЁ до значения ≈ 22 кПа за 2,5 секунды. На протяжении всего эксперимента давление жидкости в ЭЁ колеблется от 20,5 кПа до 22,5 кПа, что связано с погрешностью измерений датчика давления и техническими особенностями работы насоса. На 68-й секунде при выключении насоса происходит уменьшение давления жидкости до 0 кПа. Температуры стенки ЭЁ (рис. 4, график 1) и ЭО (рис. 4, график 2) составляют 21,2 °С и 20,05 °С соответственно. Колебания температур ЭЁ и ЭО связаны с погрешностью измерений датчиков температуры (преобразователь термоэлектрический) и измерителя регулятора.

Закупоривание ГТ жидкостью подтверждается отсутствием пузырьков гелия в спиртовой смеси, налитой на сварной шов ЭО при подаче гелия в ЭЁ после смачивания её внутренних стенок. Однако данный способ подтверждения закупоривания ГТ не гарантирует заполнение жидкостью всего канала ГТ. Подтвердить полное закупоривание ГТ жидкостью возможно с помощью численных эксперимен-

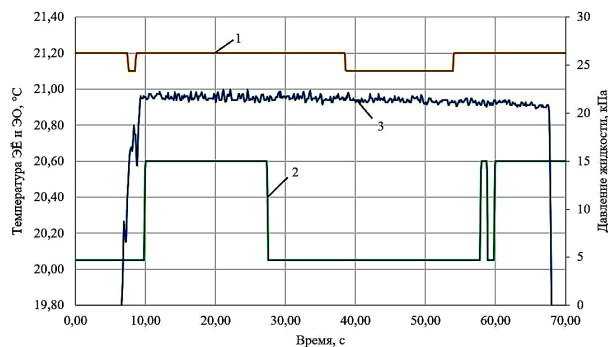


Рис. 4. Смачивание ЭЁ жидкостью: 1 — температура стенки ЭЁ (левая ось); 2 — температура ЭО (левая ось); 3 — давление жидкости внутри ЭЁ (правая ось)

Fig. 4. Wetting of the EC with liquid: 1 — temperature of the EC wall (left axis); 2 — ES temperature (left axis); 3 — liquid pressure inside the EC (right axis)

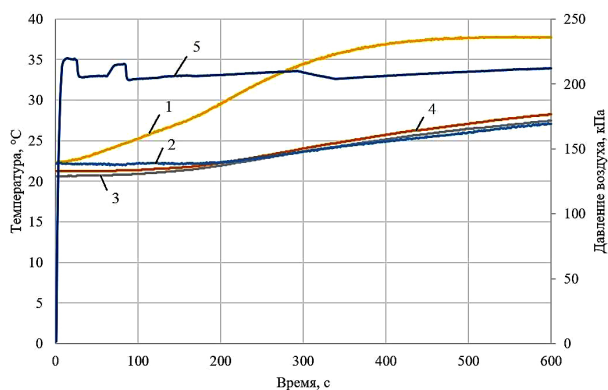


Рис. 5. Осушка ЭЁ и ЭО при подаче воздуха с температурой 40 °С: 1 — температура воздуха на входе в ЭЁ (левая ось); 2 — температура воздуха на выходе из ЭЁ (левая ось); 3 — температура стенки ЭЁ (левая ось); 4 — температура ЭО (левая ось); 5 — давление воздуха в ЭЁ (правая ось)

Fig. 5. Drying of EC and ES when supplying air with a temperature of 40 °C: 1 — air temperature at the inlet to EC (left axis); 2 — air temperature at the outlet from the EC (left axis); 3 — temperature of the EC wall (left axis); 4 — ES temperature (left axis); 5 — air pressure in the EC (right axis)

тов, которые планируются на последующих этапах исследований.

4.2 Эксперименты по осушке внутренней поверхности экспериментальной ёмкости и вскрытию гелиевой течи по методике 2.

Предварительные эксперименты по осушке ЭЁ и вскрытию ГТ после их смачивания проводились при подаче газа (очищенный и осушенный воздух) в объём ЭЁ с температурой 40 °С, массовым секундным расходом 175 л/мин и избыточном давлении в ЭЁ 200 кПа в течение 600 секунд. При этом в отдельных экспериментах дополнительно осуществлялся нагрев стенки ЭЁ с помощью ленточного нагревателя до температуры 50 °С.

На рис. 5 показан график зависимости изменения температуры воздуха на входе и на выходе из ЭЁ, температуры стенки ЭЁ и ЭО, а также давление воздуха в ЭЁ без дополнительного нагрева стенки ЭЁ ленточным нагревателем.

На рис. 5 (график 1) видно, что температура воздуха на входе в ЭЁ увеличивается с 22,5 °С до 37,5 °С за 600 секунд эксперимента. Температура воздуха на входе в ЭЁ не достигает 40 °С по причине тепловых потерь на соединительной

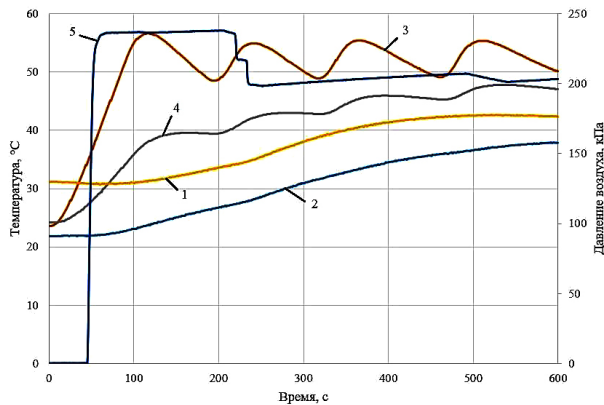


Рис. 6. Осушка ЭЭ при подаче воздуха с температурой 40 °С и дополнительным нагревом стенки ЭЭ ленточным нагревателем: 1 — температура воздуха на входе в ЭЭ (левая ось); 2 — температура воздуха на выходе из ЭЭ (левая ось); 3 — температура стенки ЭЭ (левая ось); 4 — температура ЭО (левая ось); 5 — давление воздуха в ЭЭ (правая ось)
Fig. 6. Drying of the EC by supplying air with a temperature of 40 °C and additional heating of the EC wall with a tape heater: 1 — air temperature at the inlet to the EC (left axis); 2 — air temperature at the outlet from the EC (left axis); 3 — temperature of the EC wall (left axis); 4 — ES temperature (left axis); 5 — air pressure in the EC (right axis)

и запорной арматуре. Для решения этой проблемы при проведении основных экспериментов планируется подавать воздух в экспериментальный исследовательский стенд с температурой, превышающей 40 °С, с последующим её уменьшением по мере прогрева соединительной и запорной арматуры, что позволит уменьшить отклонение температуры воздуха на входе в ЭЭ от заданного значения.

Кривые температуры воздуха на выходе из ЭЭ (рис. 5, график 2), стенки ЭЭ (рис. 5, график 3) и ЭО (рис. 5, график 4) имеют аналогичный характер. С начального момента времени до 200 секунды температуры практически не изменяются и составляют 22,2 °С, 21,2 °С и 20,5 °С соответственно. С 200 секунды до 600 секунды происходит увеличение температур до значений 27,2 °С, 28,5 °С и 27,7 °С соответственно. Таким образом, температуры рассматриваемых участников теплообмена за 600 секунд увеличиваются на 5 °С — 7,3 °С.

Давление воздуха в ЭЭ (рис. 5, график 5) в начальный момент времени резко увеличивается до 220 кПа и на протяжении всего эксперимента составляет 203 кПа–210 кПа. Колебательный характер давления связан с настройкой положения вентиля на выходе из ЭЭ.

При подаче гелия в ЭЭ пузырьков в спиртовой смеси не наблюдается, поэтому делается вывод о том, что при таком режиме осушки ГТ не вскрывалась.

На рис. 6 показаны графики изменения температуры воздуха на входе и на выходе из ЭЭ, стенки ЭЭ и ЭО, а также давление воздуха в ЭЭ при дополнительном нагреве стенки ЭЭ ленточным нагревателем.

На рис. 6 видно, что температуры стенки ЭЭ (график 3) и ЭО (график 4) начинают увеличиваться с начального момента времени, а температура воздуха на входе (график 1) и на выходе из ЭЭ (график 2) увеличивается с 50-й секунды, что связано с одновременным включением ленточного нагревателя стенки ЭЭ и нагревателя воздуха.

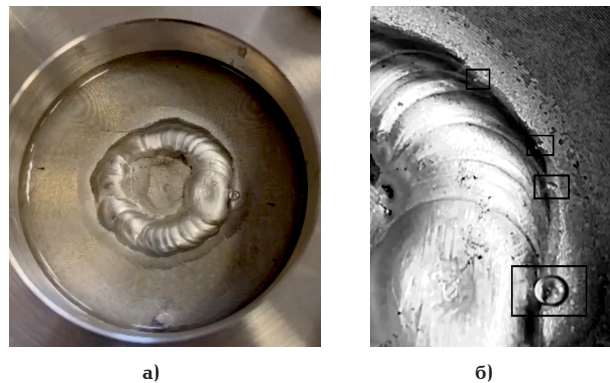


Рис. 7. Пузырьки гелия в спиртовой смеси
Fig. 7. Helium bubbles in an alcohol mixture

Температура воздуха на входе в ЭЭ (рис. 6, график 1) увеличивается с 31,2 °С до 41,7 °С. При этом температура воздуха на выходе из ЭЭ (рис. 6, график 2) увеличивается с 21,8 °С до 38,5 °С. Разница между температурой газа на входе в ЭЭ и температурой газа на выходе из ЭЭ связана с отдачей тепла стенкам ЭЭ и ЭО.

Температуры стенки ЭЭ (рис. 6, график 3) и ЭО (рис. 6, график 4) имеют колебательный характер, связанный со спецификой работы пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора температуры [15]. При достижении заданной температуры стенки ЭЭ ПИД-регулятор выдает команду на выключение ленточного нагревателя. Однако, из-за того что ленточный нагреватель разогрет, температура стенки ЭЭ увеличивается, а затем уменьшается. Этот процесс имеет вид затухающих колебаний, и через определенное время, после 600 секунд, процесс стабилизируется [16]. Температура стенки ЭЭ (рис. 6, график 3) с начального момента времени до 120 секунды резко увеличивается с 23,8 °С до 56 °С с последующим уменьшением и увеличением в окрестности 50 °С. При этом температура ЭО (рис. 6, график 4) увеличивается с 24 °С до 46 °С на момент окончания эксперимента и имеет более плавный колебательный характер, поскольку теплота от ленточного нагревателя к ЭО передается через стенку ЭЭ.

Давление воздуха в ЭЭ (рис. 6, график 5) увеличивается с 50-й секунды до 235 кПа и с 220 секунды уменьшается до 198 кПа — 208 кПа при регулировке положения вентиля на выходе из ЭЭ.

При подаче гелия в ЭЭ после её осушки наблюдается всплытие пузырьков в объеме спиртовой смеси (рис. 7), что означает вскрытие ГТ. При этом количество ГТ составляет 4 штуки (рис. 7б).

Выводы

1. Спроектирован и изготовлен экспериментальный исследовательский стенд для проведения исследований процессов тепло- и массообмена при осушке ЭЭ и вскрытии ГТ в условиях вакуумного, конвективного, кондуктивного, акустического и электромагнитного воздействий.

2. Разработаны программа и методики проведения экспериментальных исследований процессов смачивания и осушки ЭЭ и ГТ с учетом подтверждения факта вскрытия ГТ при появлении пузырьков гелия в спиртовой смеси.

3. Проведены предварительные эксперименты по отработке отдельных систем экспериментально-

го исследовательского стенда (система смачивания внутренней поверхности стенки ЭЁ и заполнения жидкостью ГТ; система подачи теплоносителя в ЭЁ; система нагрева стенки ЭЁ ленточным нагревателем; система подачи гелия в ЭЁ с ГТ) и метрологического оборудования.

4. Получены предварительные зависимости изменения давления воздуха (жидкости) в ЭЁ, а также температуры всех участников теплообмена при смачивании и осушке внутренней поверхности ЭЁ с ГТ в условиях подачи конвективного потока газа в объем ЭЁ и кондуктивного нагрева стенки ЭЁ ленточным нагревателем. За установленное время 60 секунд вскрытие ГТ произошло при использовании дополнительного нагрева стенки ЭЁ ленточным нагревателем.

5. При проведении дальнейших исследований планируется:

— провести модернизацию системы подготовки теплоносителя, позволяющую подавать нагретый газ в ЭЁ с заданной температурой и минимальными потерями тепла;

— провести основные эксперименты на модернизированном экспериментальном исследовательском стенде;

— разработать физико-математическую модель процессов смачивания жидкостью внутреннего объема ЭЁ и закупоривания ГТ жидкостью для определения параметров подачи жидкости в ЭЁ (массовый — секундный расход, давление, температура жидкости, время смачивания), при которых происходит полное закупоривание ГТ жидкостью;

— разработать физико-математическую модель процесса осушки стенки ЭЁ и вскрытия ГТ при воздействии различных факторов (конвективный поток газа, кондуктивный нагрев стенки и др.);

— провести численное моделирование процессов смачивания и осушки ЭЁ с ГТ;

— провести сравнительный анализ результатов численного моделирования и физических экспериментов.

Благодарности

Исследования проведены в рамках государственного задания № FSGF-2024-0004 «Исследования процессов осушки замкнутых ёмкостей в процессе их производства при проведении испытаний на герметичность».

Список источников

1. ОСТ 92-0019-78. Методы и режимы сушки изделий перед испытаниями на герметичность. Введ. 01–10–1979. 80 с.
2. Lin P., Basem A., Alizadeh A. [et al.]. Effect of temperature on the mechanical properties of aluminum polycrystal using molecular dynamics simulation // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024. Vol. 59. 104480. DOI: 10.1016/j.csite.2024.104480.
3. Wu C., Li J. Numerical simulation of flow patterns and the effect on heat flux during R32 condensation in microtube // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. Vol. 121. P. 265–274. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.123.
4. Диняева Н. С., Кравцов С. Б., Крумяков С. О. [и др.]. Стенд заправки тепловых трубок // *Труды МАИ*. 2022. № 126. DOI: 10.34759/trd-2022-126-13. EDN: RRYFVC.
5. Huang H., Zhai Y., Li Z. [et al.]. Thermo-hydraulic characteristics and structural optimization of supercritical CO₂-cooled microchannel heat sink // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2024. Vol. 154. 107438. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107438.

6. Liu Y., Zeng L., Chen Y. [et al.]. Improving the cooling effect of proton exchange membrane fuel cells by using biomimetic capillary cooling channels based on topology optimization method // *Applied Thermal Engineering*. 2024. Vol. 251. 123633. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123633.

7. Карпович И. Н. Моделирование перемещения жидкости в капиллярах и соплах печатающих устройств // *Инженерно-физический журнал*. 2023. Т. 96, № 2. С. 322–327. EDN: UIFKRZ.

8. Naghashnejad M., Shabgard H., Bergman T. L. A novel computational model of the dynamic response of the evaporating liquid-vapor interface in a capillary channel // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. Vol. 186. 122496. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122496.

9. Cai L., Lu Y., Zhang L. [et al.]. Leak tightness tests of mechanical seal joints for HL-2M tokamak under thermal cycle loads // *Vacuum*. 2023. Vol. 218. 112614. DOI: 10.1016/j.vacuum.2023.112614.

10. Соловьев В. Н., Кологов А. В., Барышников В. И. Исторические аспекты применения единиц измерений в гелиевом течеискусании // *Вакуумная техника и технология*. 2019. Т. 29. № 1. С. 23–25. EDN: EWCDJW.

11. Incropera F. P., DeWitt D. P., Bergman T. L. [et al.]. *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons, 2011. 1048 p. ISBN 1119722489; 978-1119722489. URL: <https://mech.at.ua/HeatandMassTransfer7thEdition-Incropera-dewitt.pdf> (дата обращения: 12.03.2024).

12. ГОСТ Р 8.736-2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. Введ. 01–01–2013. Москва: Стандартинформ, 2019. 21 с.

13. ГОСТ 24026-80. Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения. Введ. 01–01–1981. Москва: Изд-во стандартов, 1991. 19 с.

14. Бойко А. Ф., Кудеников Е. Ю. Точный метод расчета необходимого количества повторных опытов // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. 2016. № 8. С. 128–132. EDN: WHTDML.

15. Денисенко В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации // *Современные технологии автоматизации*. 2008. № 1. С. 86–99. URL: <https://www.cta.ru/cms/f/364276.pdf> (дата обращения: 12.03.2024).

16. Спицын В. С., Спицын В. В. Алгоритмы управления температурой в помещениях // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2012. № 35. С. 79–84. EDN: PEWAJJ.

ЛЕСНЯК Иван Юрьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий, доцент кафедры «Машиноведение» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 6114-0646

ORCID: 0000-0002-9481-5985

ResearcherID: E-6397-2014

Адрес для переписки: lesnyak.ivan@gmail.com

Для цитирования

Лесняк И. Ю. Экспериментальные исследования вскрытия течей в сварном шве замкнутой ёмкости при тепловом и акустическом воздействиях // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2024. Т. 8, № 3. С. 80–89. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-3-80-89.

Статья поступила в редакцию 17.06.2024 г.

© И. Ю. Лесняк

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF OPENING LEAKS IN A WELDED SEAM OF A CLOSED CONTAINER UNDER THERMAL AND ACOUSTIC INFLUENCES

I. Yu. Lesnyak

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

To conduct experimental investigations of the drying process of a closed container, taking into account the opening of a leak channel in a weld, an experimental research stand, an experimental container and experimental samples with model leaks of different sizes are designed and manufactured. The scientific problem of experimental research has been formulated, a program and methods for conducting experiments have been developed. Requirements for metrological equipment have been formed and the measurement error of temperature, humidity and pressure has been determined. Preliminary experiments are carried out on wetting the experimental container and experimental samples with a model liquid and clogging the leak channels, as well as on drying the inner surface of the experimental container wall with a convective gas flow and conductive heating of the wall until the leak channels clogged with liquid are opened. The dependences of the change in temperature of the liquid, air, wall of the experimental container, experimental samples and pressure in the experimental container are obtained over the time of the experiment during wetting and drying of the experimental container and experimental samples. The parameters of thermal exposure at which the leak channels is opened within a specified time are determined.

Keywords: leak channel, container drying, experiment, ultrasound, low pressure, capillary.

Acknowledgements

The research is carried out within the framework of state assignment No. FSGF-2024-0004 «Investigations of closed vessels drying processes in the process of their production during leak tightness tests».

References

1. OST 92-0019-78. Metody i rezhimy sushki izdeliy pered ispytaniyami na germetichnost' [Methods and modes of products drying prior to air-pressure test]. 80 p. (In Russ.).
2. Lin P., Basem A., Alizadeh A. [et al.]. Effect of temperature on the mechanical properties of aluminum polycrystal using molecular dynamics simulation // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024. Vol. 59. 104480. DOI: 10.1016/j.csite.2024.104480. (In Engl.).
3. Wu C., Li J. Numerical simulation of flow patterns and the effect on heat flux during R32 condensation in microtube // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. Vol. 121. P. 265 – 274. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.123. (In Engl.).
4. Dinyayeva N. S., Kravtsov S. B., Krumlyakov S. O. [et al.]. Stend zapravki teplovykh trubok [Stand for filling heat pipes] // *Trudy MAI. Trudy MAI*. 2022. No. 126. DOI: 10.34759/trd-2022-126-13. EDN: RRYFVC. (In Russ.).
5. Huang H., Zhai Y., Li Z. [et al.]. Thermo-hydraulic characteristics and structural optimization of supercritical CO₂-cooled microchannel heat sink // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2024. Vol. 154. 107438. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107438. (In Engl.).
6. Liu Y., Zeng L., Chen Y. [et al.]. Improving the cooling effect of proton exchange membrane fuel cells by using biomimetic capillary cooling channels based on topology optimization method // *Applied Thermal Engineering*. 2024. Vol. 251. 123633. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123633. (In Engl.).
7. Karpovich I. N. Modelirovaniye peremeshcheniya zhidkosti v kapillyarakh i soplakh pechatayushchikh ustroystv [Modeling the movement of a liquid in capillaries and nozzles of printers] // *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal. Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2023. Vol. 96, no. 2. P. 322 – 327. EDN: UIFKRZ. (In Russ.).
8. Naghashnejad M., Shabgard H., Bergman T. L. A novel computational model of the dynamic response of the evaporating liquid-vapor interface in a capillary channel // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. Vol. 186. 122496. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122496. (In Engl.).
9. Cai L., Lu Y., Zhang L. [et al.]. Leak tightness tests of mechanical seal joints for HL-2M tokamak under thermal cycle loads // *Vacuum*. 2023. Vol. 218. 112614. DOI: 10.1016/j.vacuum.2023.112614. (In Engl.).
10. Solov'yev V. N., Kologov A. V., Baryshnikov V. I. Istoricheskiye aspekty primeneniya edinits izmereniy v geliyevom techeiskanii [Historical aspects of the use of units of measurement in helium leak detection] // *Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya. Vacuum Equipment and Technology*. 2019. Vol. 29, no. 1. P. 23 – 25. EDN: EWCDJW. (In Russ.).
11. Incropera F. P., DeWitt D. P., Bergman T. L. [et al.]. Fundamentals of heat and mass transfer. John Wiley & Sons, 2011. 1048 p. ISBN 1119722489; 978-1119722489. URL: <https://mech.at.ua/HeatandMassTransfer7thEdition-Incropera-dewitt.pdf> (accessed: 12.03.2024). (In Engl.).
12. GOST R 8.736-2011. Izmereniya pryamyie mnogokratnyie. Metody obrabotki rezul'tatov izmereniy. Osnovnyie polozheniya [State system for ensuring the uniformity of measurements. Multiple direct measurements. Methods of measurement results processing. Main principles]. Moscow, 2019. 21 p. (In Russ.).

13. GOST 24026-80. Issledovatel'skiye ispytaniya. Planirovaniye eksperimenta. Terminy i opredeleniya [Research tests. Experiment planning. Terms and definitions]. Moscow, 1991. 19 p. (In Russ.).

14. Boyko A. F., Kudenikov E. Yu. Tochnyy metod rascheta neobkhodimogo kolichestva povtornykh opytov [Exact methods calculate the necessary amount of repeat experience] // Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after. V. G. Shukhov*. 2016. No. 8. P. 128–132. EDN: WHTDML. (In Russ.).

15. Denisenko V. PID-regulyatory: voprosy realizatsii [PID controllers: implementation issues] // *Sovremennyye tekhnologii avtomatizatsii. Modern Automation Technologies*. 2008. No. 1. P. 86–99. URL: <https://www.cta.ru/cms/f/364276.pdf> (accessed: 12.03.2024). (In Russ.).

16. Spitsyn V. S., Spitsyn V. V. Algoritmy upravleniya temperatury v pomeshcheniyakh [Algorithms for temperature control in buildings] // Vestnik YuUrGU. Seriya «Komp'yuternyye tekhnologii, upravleniye, radioelektronika». *Vestnik SUSU. Series «Computer Technology, Automatic Control, Radio Electronics»*. 2012. No. 35. P. 79–84. EDN: PEWAJJ. (In Russ.).

LESNYAK Ivan Yurievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head, Associate Professor of Machine Engineering Technology Department, Omsk State Technical University, Omsk.
SPIN-code: 6114-0646
ResearcherID: E-6397-2014
ORCID: 0000-0002-9481-5985.
Correspondence address: lesnyak.ivan@gmail.com

For citation

Lesnyak I. Yu. Experimental investigations of opening leaks in a welded seam of a closed container under thermal and acoustic influences // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2024. Vol. 8, no. 3. P. 80–89. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-3-80-89.

Received June 17, 2024.

© **I. Yu. Lesnyak**