

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 621.039.5

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-04>

EDN HSFGRF

Оригинальная статья / Original paper



Расчетно-экспериментальное обоснование работоспособности уплотнений
элементов локализирующих систем безопасности энергоблоков с ВВЭР

С.Б. Кравец¹ , С.А. Кузин^{2,3} , В.М. Сапельников³
С.Е. Синельщикова³, А.А. Поволоцкая³, В.Г. Бекетов³

¹ ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности»,
г. Москва, Российская Федерация

² АО «Атоммашэкспорт», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация

³ Волгодонский инженерно-технический институт Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация
 KuzinSergey55@mail.ru

Аннотация. Актуальность данной работы определена необходимостью прогнозировать работу узлов уплотнений для элементов локализирующих систем безопасности (ЛСБ) энергоблоков с ВВЭР, к которым относятся (проходки, люки, шлюзы, двери и другие элементы герметичного ограждения (ГО) в эксплуатационных режимах. Под эксплуатационными режимами понимаются режимы нормальной эксплуатации, режимы нарушения нормальной эксплуатации, а также аварийные ситуации. При изготовлении и эксплуатации элементов ЛСБ возникает проблема неравномерного выступления двухрядного резинового уплотнения из пазов в полотне элемента ЛСБ, что приводит к необходимости уточнения интегрального усилия обжатия уплотнения в целом для этого элемента. Проблема вызвана несовершенством технологии изготовления полотен больших размеров для элементов ЛСБ (двери, люки, шлюзы: периметр уплотнений может достигать 10-20 м, диаметр полотна 2-6 м) и необходимостью при этом выдерживать жесткие технологические требования по плоскостности, параллельности и предельным отклонениям по линейным и угловым размерам. Изготовление габаритных конструкций усложняется наличием сварных соединений, термообработки, сложности металлообработки. Усилие обжатия резиновой прокладки ПНАЭ-7-002-86 не регламентируется, поэтому для надежного конструирования механизмов обжатия прокладки была определена величина этого усилия. На основе полученных результатов испытаний резиновых уплотнений на герметичность и циклические нагрузки выполнена оценка герметичности применяемых резиновых уплотнений, выполнены расчеты деформаций резиновых уплотнений по программному комплексу МКЭ. Разработаны рекомендации по увеличению надежности работы узлов уплотнений для элементов локализирующих систем безопасности (ЛСБ) энергоблоков с ВВЭР в эксплуатационных режимах и выбору величины обжатия для определения необходимого усилия, обеспечивающего герметичность в начале эксплуатации и через 5000 циклов открытия-закрытия.

Ключевые слова: проходки, шлюз, резиновые уплотнения, элементы локализирующих систем безопасности, эксплуатационные режимы, ВВЭР

Для цитирования: Кравец С.Б., Кузин С.А., Сапельников В.М., Синельщикова С.Е., Поволоцкая А.А., Бекетов В.Г. Расчетно-экспериментальное обоснование работоспособности уплотнений элементов локализирующих систем безопасности энергоблоков с ВВЭР. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(2):40–51. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-04>

For citation: Kravets S.B., Kuzin S.A., Sapelnikov V.M., Sinelshchikova S.E., Povolotskaya A.A., Beketov V.G. Computational and experimental substantiation of the operability of seals of localizing safety system elements of power units with VVER. *Global nuclear safety*. 2024;14(2):40–51 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-02-04>

Computational and experimental substantiation of the operability of seals of localizing safety system elements of power units with VVER

Sergey B. Kravets¹ , Sergey A. Kuzin^{2,3}  , Vyacheslav M. Sapelnikov³ ,
Sofya E. Sinelshchikova³, Anastasia A. Povolotska³, Vladimir G. Beketov³ 

¹Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (SEC NRS),
Moscow, Russian Federation

²JSC «Atommashexport», Volgogradsk, Rostov region, Russian Federation

³Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,

³Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation

 KuzinSergey55@mail.ru

Abstract. The relevance of this work is determined by the need to predict the operation of sealing assemblies for elements of localizing safety systems (LSSs) of power units with VVER, which include (penetrations, hatches, locks, doors and other elements of hermetic fencing (GF) in operational modes. Operational modes are understood as modes of normal operation, modes of violation of normal operation, as well as emergency situations. During the manufacture and operation of LSS elements, the problem arises of uneven protrusion of a double-row rubber seal from the grooves in the web of the LSS element, which leads to the need to clarify the integral compression force of the seal as a whole for this element. The problem is caused by the imperfection of the manufacturing technology of large canvases for LSS elements (doors, hatches, locks: the perimeter of the seals can reach 10-20 m, the diameter of the canvas 2-6 m) and the need to withstand stringent technological requirements for flatness, parallelism and marginal deviations in linear and angular dimensions. The manufacture of overall structures is complicated by the presence of welded joints, heat treatment, and the complexity of metalworking. Compression force of the PNAE rubber gasket-7-002-86 it is not regulated, therefore, for the reliable design of gasket compression mechanisms, the magnitude of this force was determined. Based on the obtained results of tests of rubber seals for tightness and cyclic loading [7], an assessment of the tightness of the applied rubber seals is performed, calculations of deformations of rubber seals are performed using the FEM software package. Recommendations have been developed to increase the reliability of seal assemblies for elements of localizing safety systems (LSSs) of VVER power units in operational modes and to select the compression value to determine the necessary force to ensure tightness at the beginning of operation and after 5000 opening-closing cycles.

Keywords: penetrations, sluice, rubber seals, elements of localizing safety systems, operating modes, VVER.

Основной функцией локализирующих систем безопасности (далее – ЛСБ) атомных электрических станций, согласно Общим положениям обеспечения безопасности атомных станций¹, является ограничения распространения радиоактивных веществ за границы локализации аварии. Эта функция

должна выполняться в режимах нормальной эксплуатации, режимах нарушения нормальной эксплуатации и при протекании проектных аварий. В связи с этим обеспечение работоспособности уплотнений элементов ЛСБ является важной задачей обеспечения радиационной безопасности². Уплотне-

¹ Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. Основные положения. НП-001-15. – Режим доступа: https://docs.secnrs.ru/documents/nps/НП-001-15/НП-001-15_conv.pdf (дата обращения: 14.03.2024).

² Правила устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций. НП-010-16. – Режим доступа: https://docs.secnrs.ru/documents/nps/НП-010-16/НП-010-16_conv.pdf (дата обращения: 15.03.2024).

ния элементов ЛСБ образуют границу зоны локализации аварии и должны обеспечивать требуемую в соответствии с проектом АЭС герметичность как при нормальной эксплуатации АЭС, так и при нарушениях нормальной эксплуатации, включая проектные аварии.

К уплотнениям элементов ЛСБ (шлюзы, герметичные двери) предъявляются специальные требования: радиационная стойкость, большой температурный диапазон работы (минус 50 °С до плюс 200 °С); малое усилие обжатия; большой «рабочий ход», обеспечивающий герметичность соединения. Поэтому с целью обеспечения радиационной стойкости и повышенного температурного диапазона рабочих температур уплотнения элементов ЛСБ изготавливаются из специальной резины по ТУ 38 1051325-2008 «Изделия резинотехнические для атомной техники»³.

При работе транспортного шлюза проводится постоянный контроль герметичности с использованием специальной системы, обеспечивающий постоянный мониторинг протечек воздуха. Предельные величины протечек воздуха определяются и обосновываются в проектной документации на шлюз, а затем приводятся в технологическом регламенте безопасной эксплуатации энергоблока АЭС.

Для снижения усилия обжатия уплотнения и обеспечения увеличенного по сравнению с применявшимися ранее уплотнениями «рабочего хода», обеспечивающего герметичность соединения, в 2012 г. ОАО «ВНИИАМ» была предложена новая конструкция уплотнения, которая нашла применение на всех современных энергоблоках АЭС с ВВЭР для уплотнения разъемных соединений шлюзов. Примерная конструкция уплотнения шлюза показана на рисунке 1, а установка уплотнений показана на рисунке 2. Необходимость установки двухрядного резинового уплотнения обусловлена требо-

ваниями контроля герметичности, осуществляемого путем контроля давления в объеме, расположенном между двумя прокладками.

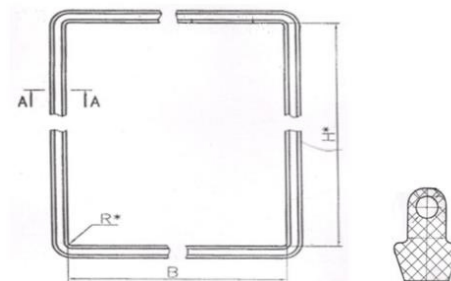


Рисунок 1. Уплотнение шлюза [составлено по рабочей конструкторской документации шлюза для шлюзов Нововоронежской АЭС-2]

Figure 1. Gateway sealing [compiled according to the working design gateway documentation for Novovoronezh NPP-2 gateways]

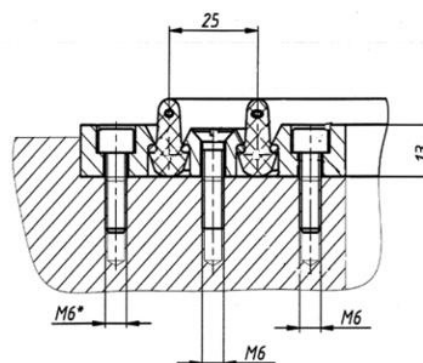


Рисунок 2. Установка уплотнений [составлено по рабочей конструкторской документации шлюза транспортного для Нововоронежской АЭС-2 (черт. АМЕ 720. 00.00.000СБ)]

Figure 2. Installation of seals [compiled according to the working design gateway documentation for Novovoronezh NPP-2 gateways (AME 720. 00.00.000SB drawing)]

При изготовлении и эксплуатации элементов ЛСБ возникает проблема неравномерного выступания двухрядного резинового уплотнения из пазов в полотне элемента ЛСБ, что приводит к необходимости уточнения интегрального усилия обжатия уплотнения в целом для этого элемента. Проблема вызвана несовершенством технологии изготовления полотен больших размеров для элементов ЛСБ (двери, люки, шлюзы: периметр уплотнений может достигать 10-20 м, диаметр полотна 2-6 м) и необходимостью

³ ТУ 38 1051325-2008 «Изделия резинотехнические для атомной техники». – Режим доступа: <https://niemi.ru/study/TU/tu-38-1051325-2008/> (дата обращения: 15.03.2024).

при этом выдерживать жесткие технологические требования по плоскостности, прямолинейности и предельным отклонениям по линейным и угловым размерам.

По требованиям чертежей предельные отклонения линейных размеров принимаются по ГОСТ 30893.12002⁴ (табл. 1), а допуски прямолинейности и плоскостности по ГОСТ 30893.22002⁵ (табл. 2).

Таблица 1. Предельные отклонения линейных размеров (размеры в мм) [составлено по ГОСТ 30893.1-2002]

Table 1. Limit deviations of linear dimensions (dimensions are given in mm) [compiled according to the GOST 30893.1-2002]

Класс точности	Предельные отклонения для интервала номинальных размеров					
	св. 400 до 1000	св. 1000 до 2000	св. 2000 до 4000	св. 4000 до 6000	св. 6000 до 8000	св. 8000 до 10000
Средний m	±0,8	±1,2	±1,2	± 3	± 5	± 8

Таблица 2. Общие допуски прямолинейности и плоскостности (размеры в мм) [составлено по ГОСТ 30893.2-2002]

Table 2. General straightness and flatness tolerances (dimensions are given in mm) [compiled according to the GOST 30893.2-2002]

Класс точности	Предельные отклонения для интервала номинальных размеров			
	св. 30 до 100	св. 100 до 300	св. 300 до 1000	св. 1000 до 3000
L	0,4	0,8	1,2	1,6

Величины предельных отклонений, указанные в таблицах 1 и 2, сравнимы с величинами обжатия прокладки для номинальных размеров полотен элементов ЛСБ, что может привести к необходимости увеличения усилия обжатия уплотнений. Изготовление габаритных конструкций усложняется наличием сварных соединений и последующей термообработкой, что может привести к короблению конструкции. Для контроля протечек воздуха использовался измеритель протечек, фрагмент принципиальной схемы которого приведен на рисунке 3.

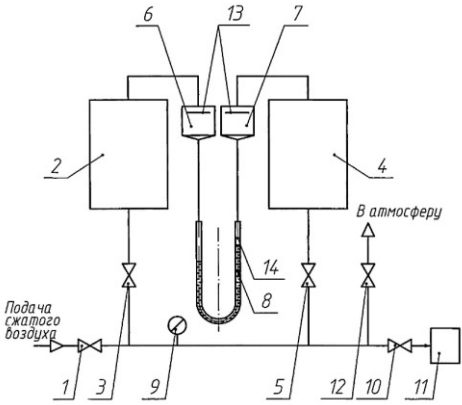


Рисунок 3. Фрагмент принципиальной схемы измерителя протечек [составлено по Патенту РФ: RU №129289 U1⁶]

Figure 3. A fragment of the leak meter schematic diagram [compiled according to the Russian Federation Patent: RU №129289 U1⁶]

⁴ ГОСТ 30893.1-2002 Основные нормы взаимозаменяемости. Общие допуски. Предельные отклонения линейных и угловых размеров с неуказанными допусками. – Режим доступа: https://www.testprom.ru/img_user/gosts/17/040/gost_30893.1-2002.pdf (дата обращения: 15.03.2024).

⁵ ГОСТ 30893.2-2002 Основные нормы взаимозаменяемости. Общие допуски. Допуски формы и расположения поверхностей, не указанные индивидуально. – Режим доступа:

https://www.testprom.ru/img_user/gosts/17/040/gost_30893.2-2002.pdf (дата обращения: 15.03.2024).

⁶ Патент РФ: RU №129289 U1, МПК от 09.01.2013. Устройство для измерения величины протечки газовой среды уплотнительных элементов локализирующих систем безопасности АЭС. Патентообладатели: Кравец Б.И., Кравец С.Б. Опубликовано 20.06.2013 Бюл. № 17. – Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU129289U1_20130620 (дата обращения: 15.06.2024).

Измеритель содержит запорный клапан 1, управляющий подачей сжатого воздуха к компенсационной камере 2 (через клапан 3) и измерительной камере 4 (через клапан 5). К камерам через расширители 6 и 7 подключен U-образный дифференциальный манометр 8 для измерения разности давления. При этом левый конец U-образной трубки подключен к расширителю 6, а правый – к расширителю 7. Между клапанами 3 и 5 подключен манометр для измерения давления, заданного по «программе испытаний». Клапан 10 подключен к испытываемому изделию 11. Клапан 12 подключен к атмосфере. В расширителях 6 и 7 установлены пластинки 13, выполняющие функцию отбойника при резком сбросе давления, заставляя жидкость возвращаться в дифманометр 8, не попадая в камеры. Мерное стекло 14 дифманометра заполнено окрашенной дистиллированной водой.

Измеритель протечек обеспечивал следующие характеристики:

- измерение расхода воздуха проводилось при постоянном давлении (имелся сосуд компенсации давления);
- высокая точность измерений протечек воздуха, ввиду измерения не самого давления воздуха, а перепада давлений между контролируемой полостью и зоной истечения;
- прямой метод измерения перепада.

В качестве нагружающего устройства, использующегося для организации циклов нагружения с заданной скоростью и усилием, использовалась система, состоящая из гидроцилиндра, штоком механически связанного с нагружающей подвижной крышкой, осуществляющей вертикальную нагрузку на уплотнение, концевого клапана, сообщенного с напорным трубопроводом от насоса, и гидравлически связанного через дроссель с концевым клапаном, сообщенным со сливным трубопроводом.

Согласно ПНАЭ Г-7-002-86⁷ и ГОСТ Р 59115.16-2021⁸ нормативные требования

сформированы только для резиновых прокладок плоской формы. В настоящее время для резиновых прокладок, применяемых в качестве уплотнения транспортных шлюзов, нет не только нормативных требований, регламентирующих параметры этих уплотнений, но и отсутствуют рекомендации по расчету подобных прокладок в справочной литературе [1,2]. Согласно ТУ 38 1051325-2008 в число нормативных требований к резиновым прокладкам, приведенным в таблице 3, не включено минимальное усилие обжатия этой прокладки, обеспечивающее герметичность уплотнения. Следовательно, для обеспечения надежной работы уплотнений транспортных шлюзов, необходимо определить необходимые параметры, позволяющие обеспечить герметичность и работоспособность данных уплотнений на расчетный период эксплуатации.

С целью определения параметров, позволяющих выполнить расчетное обоснование герметичности узла уплотнения, были использованы результаты экспериментальных исследований ОАО «ВНИИАМ» г. Волгодонска, выполненных для данных резиновых прокладок [3]. В таблице 4 представлены приведенные в работе «Прогнозирование работы узлов уплотнений для транспортных шлюзов энергоблоков с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 в эксплуатационных режимах» [3] результаты проверки работоспособности уплотнения (см. рис. 1), после выполнения циклов нагружения усилиями различной интенсивности.

издат, 1989. – 525 с. – Режим доступа: <https://www.gostrf.com/normadata/1/4293842/4293842075.pdf> (дата обращения: 14.03.2024).

⁸ ГОСТ Р 59115.16-2021 Национальный стандарт Российской Федерации. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Расчет на прочность разъемных соединений. – Москва: ФГБУ «РСТ», 2021. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200181934> (дата обращения: 15.03.2024).

⁷ Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г-7-002-86. – Москва: Энергоатом-

Таблица 3. Требования к резиновым прокладкам [составлено по ПНАЭ Г-7-002-86 и ГОСТ Р 59115.16-2021]

Table 3. Rubber table requirements [compiled according to PNAE G-7-002-86 and GOST R 59115.16-2021]

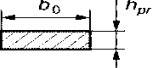
Конструкция про- кладки	Материал	Эффективная ширина b , мм	Воздух, пар, пароводяная смесь	
			m	q_0 , МПа
	Резина твердая	b_0	2,2	9

Таблица 4. Результаты испытаний на работоспособность прокладки [составлено авторами с использованием ранее полученных результатов [3]]

Table 4. Gasket operability test results [compiled by the authors using previously obtained results[3]]

Усилие обжатия, Н/мм	Исходное состояние		После наработки 2500 циклов		После наработки 5000 циклов	
	Обжатие, мм	Протечки, Па	Обжатие, мм	Протечки, Па	Обжатие, мм	Протечки, Па
3,74	0,99	негерм.>500 Па	0,9	негерм.>500 Па	0,91	негерм.>500 Па
6,88	1,45	негерм.>500 Па	1,39	негерм.>500 Па	1,54	40
10,02	2,0	40	1,99	50	2,21	40
13,16	2,42	40	2,33	40	2,45	40
1630	3,01	30	2,82	40	2,81	50
19,44	3,52	30	3,0	40	3,07	30
22,58	3,76	30	3,21	40	3,24	30
25,72	3,97	20	3,43	40	3,45	40
28,86	4,11	20	3,7	30	3,64	30
32,00	4,17	20	3,75	30	3,71	30

Обработка экспериментальных данных по испытанию работоспособности прокладки (см. рис. 2) после наработки 2500, 5000 циклов нагружения проведена с определением коэффициентов уравнения регрессии по методу наименьших квадра-

тов, описывающую зависимость величины обжатия $\delta_{\text{экс}}$ от усилия P по работам А.Д. Селютина [4], Дж. Тейлора [5], И.В. Митина и В.С. Русакова⁹ также по ГОСТ Р 8.997-2021¹⁰ и ГОСТ Р 8.736-2011¹¹.

Уравнение линейной регрессии (1) имеет вид:

$$\delta_{\text{экс}} = a_0 + a_1 \cdot P_{\text{экс}} + a_2 \cdot P_{\text{экс}}^2 \quad (1)$$

В случае прямо измеряемых величин $\delta_{\text{экс}}, P_{\text{экс}}$ получим формулы для коэффициентов линейной регрессии a_0, a_1, a_2 в

уравнении (1) приведены в [4-5]^{5,6,7}. Коэффициент корреляции определяется по формуле (2):

⁹ Митин И.В., Русаков В.С. Анализ и обработка экспериментальных данных: учебно-методическое пособие для студентов младших курсов. – Москва : Физический Факультет МГУ. – 44 с. Режим доступа: https://portal.tpu.ru/SHARED/s/SHAMSHUT/study/labs/Tab1/I_V_Mitin_V_S_Rusakov.pdf (дата обращения: 12.03.2024).

¹⁰ ГОСТ Р 8.997-2021 Национальный стандарт Российской Федерации. Алгоритмы оценки метрологических характеристик при аттестации методик измерений в области исполь-

зования атомной энергии. – Москва: Стандартинформ, 2021. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200179190> (дата обращения: 14.03.2024).

¹¹ ГОСТ Р 8.736-2011 Национальный стандарт Российской Федерации. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – Москва: Стандартинформ, 2013. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200089016> (дата обращения: 15.03.2024).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}) \cdot (\delta_i - \bar{\delta})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta})^2}}, \quad (2)$$

где $\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$, $\bar{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n}$ – средние величины усилия обжатия и величины обжатия соответственно.

Результаты расчета зависимости обжатия прокладки $\delta_{\text{расч}}$ от расчетного усилия про-

жатия $P_{\text{расч}}$ в режимах «Исходное состояние», «После наработки 2500 циклов», «После наработки 5000 циклов» приведены в таблице 5.

Таблица 5. Результаты испытаний на работоспособность прокладки [составлено авторами]

Table 5. Gasket operability test results [compiled by the authors]

a_0 , мм	a_1 , мм/Н	a_2 , мм/Н ²	r
Исходное состояние			
0,0329	0,2363	-0,0033	0,974
После наработки 2500 циклов			
0,202	0,1995	-0,0028	0,975
После наработки 5000 циклов			
0,2752	0,2062	-0,0031	0,963

Экспериментальные зависимости величины прожатия (вертикальной деформации) уплотнения от погонного усилия при исходном состоянии, после наработки 2500 циклов и наработки 5000 циклов изображены

соответственно на рисунках 4, 5 и 6. Диапазон изменения погонной нагрузки: от 3,74 Н/мм до 32 Н/мм. Так как зависимость нелинейная, то можно пользоваться только интерполяцией внутри этого диапазона.

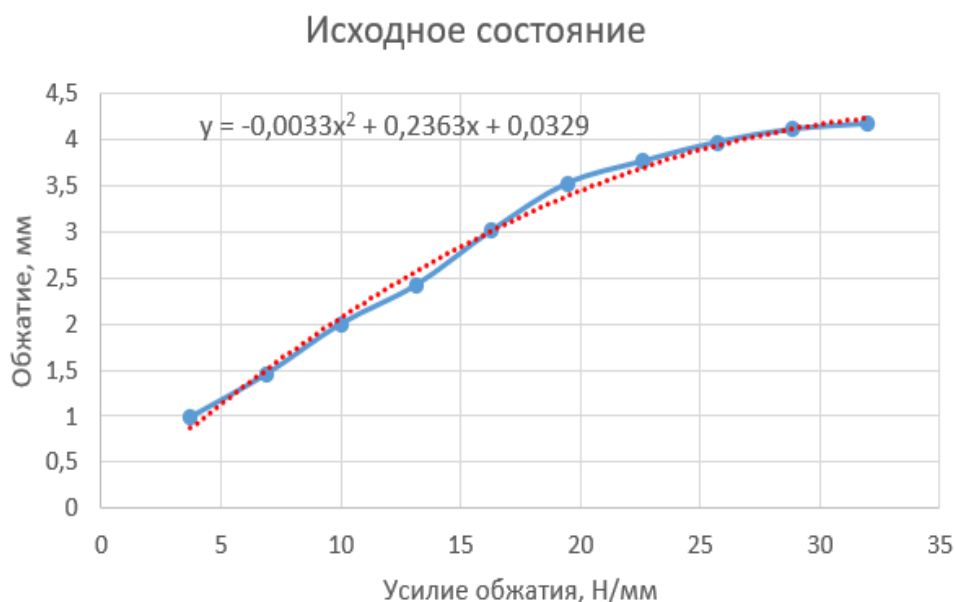


Рисунок 4. Экспериментальные зависимости величины прожатия в мм от погонного усилия Н/мм при исходном состоянии [составлено авторами]

Figure 4. Experimental dependences of the compression value in mm on the linear force N/mm at the initial state [compiled by the authors]

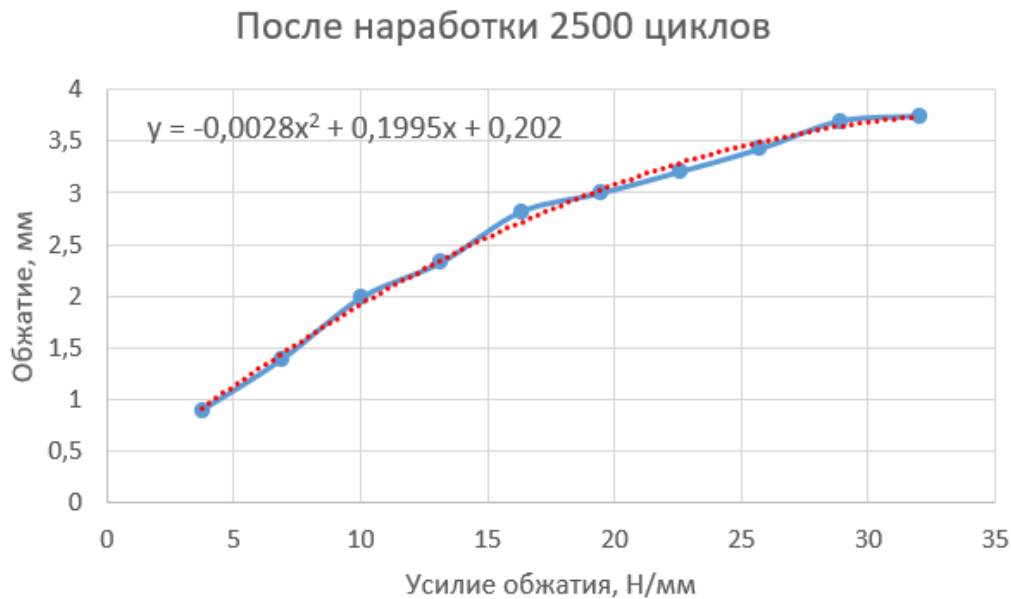


Рисунок 5. Экспериментальные зависимости величины прожатия в мм от погонного усилия Н/мм после наработки 2500 циклов [составлено авторами]

Figure 5. Experimental dependences of the compression value in mm on the linear force N/mm after 2500 cycles [compiled by the authors]

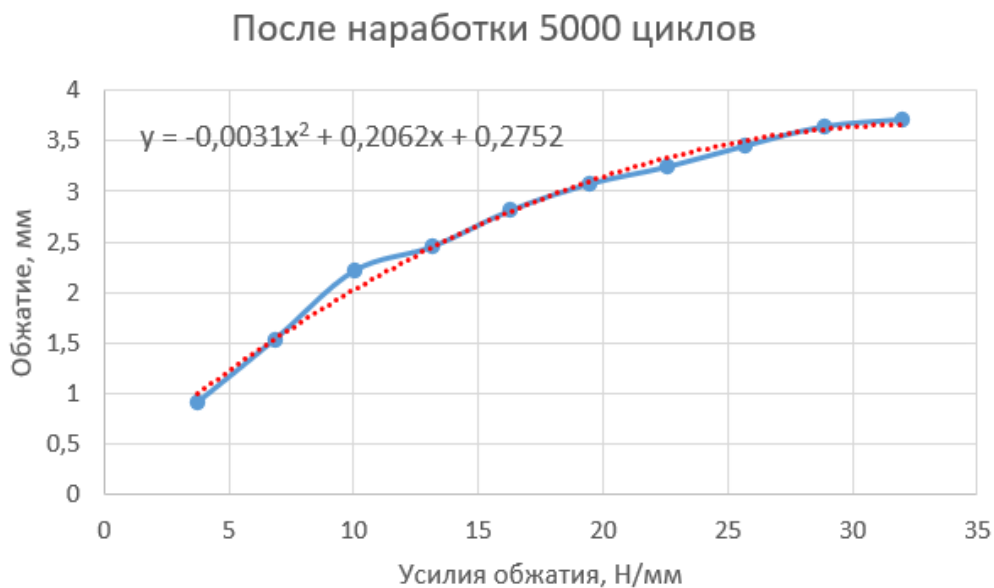


Рисунок 6. Экспериментальные зависимости величины прожатия в мм от погонного усилия кгс/мм после наработки 5000 циклов [составлено авторами]

Figure 6. Experimental dependences of the compression value in mm on the linear force kgf/mm after running 5000 cycles [compiled by the authors]

Расчет усилия обжатия прокладки был проведен по программе конечно-элементного анализа ANSYS¹². Для оценки

обжатия прокладки была построена трёх-мерная конечно-элементная модель прокладки, изображенная на рисунке 7.

¹² Расчетный комплекс ANSYS. Лицензия № 1070122. – Режим доступа: <https://cvs.spb.su/PAPERS/ANSYS-CVS.pdf> (дата обращения: 15.03.2024).

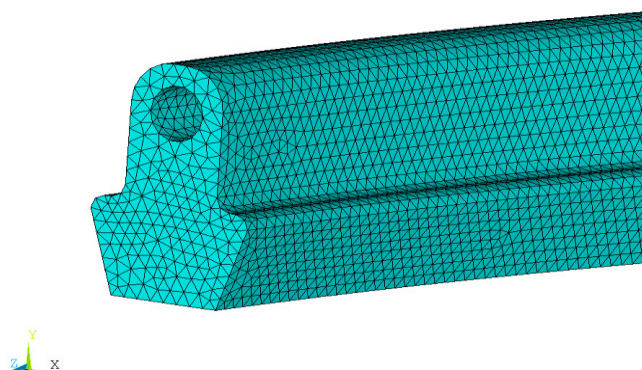


Рисунок 7. Трехмерная конечно-элементная модель прокладки [составлено авторами в программе ANSYS]

Figure 7. Three-dimensional finite element model of the gasket [compiled by the authors in ANSYS software]

При создании модели прокладки использовался конечный элемент SOLID92 (рис. 8), представляющий собой квадратичный элемент (II порядка), пригодный для моделиро-

вания нерегулярных сеток. Краткая характеристика элемент SOLID92: определяется десятью узлами, имеющими три степени свободы в каждом узле.

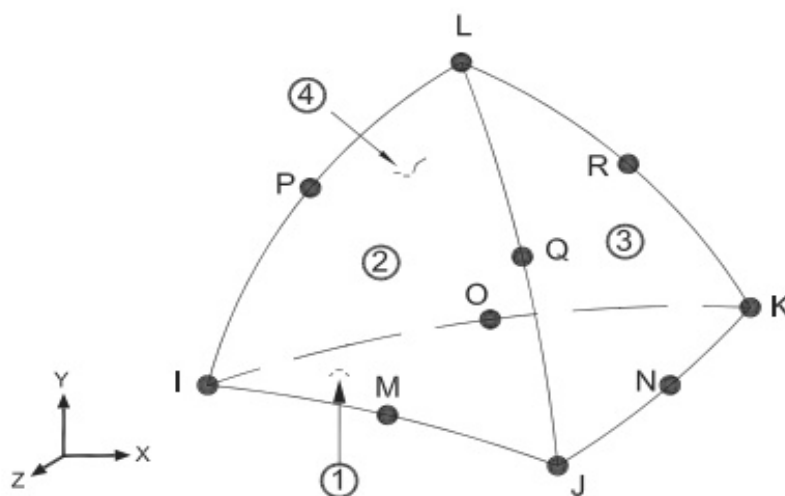


Рисунок 8. Конечный элемент SOLID 92 [составлено авторами в программе ANSYS]

Figure 8. SOLID 92 finite element [compiled according to the 10 GOST P 8.997-2021]

При построении расчетной модели прокладки были использованы следующие характеристики резины: $E = 0,9 \cdot 10^7$ Па – модуль упругости; $\mu = 0,46$ – коэффициент Пуассона. Для выбора и оптимизации параметров конечно-элементной модели, в том числе достаточности густоты конечно-элементной сетки, были выполнены предварительные расчёты. Оптимальные размеры

конечно-элементной сетки были приняты для модели сетки, увеличение числа элементов которой дало изменение вычислений не более 3%. Результаты сравнения результатов расчетов, выполненных в программе ANSYS, с экспериментальными данными, представленными в ГОСТ Р 59115.16-2021, приведены в таблице 6 и на рисунке 9.

Таблица 6. Значения прожатия (вертикальной деформации) уплотнения в зависимости от усилия обжатия [составлено авторами]

Table 6. Values of compression (vertical deformation) of the seal depending on the compression force [compiled by the authors]

Усилие обжатия, Н/мм	При испытаниях после 1 цикла в исходном состоянии	В программе ANSYS после 1 цикла в исходном состоянии
	Обжатие, мм	
3,74	0,99	1,02
6,88	1,45	1,55
10,02	2,00	2,11
13,16	2,42	2,64
16,30	3,01	3,21
19,44	3,52	3,68
22,58	3,76	3,95
25,72	3,97	4,14
28,86	4,11	4,29
32,00	4,17	4,35

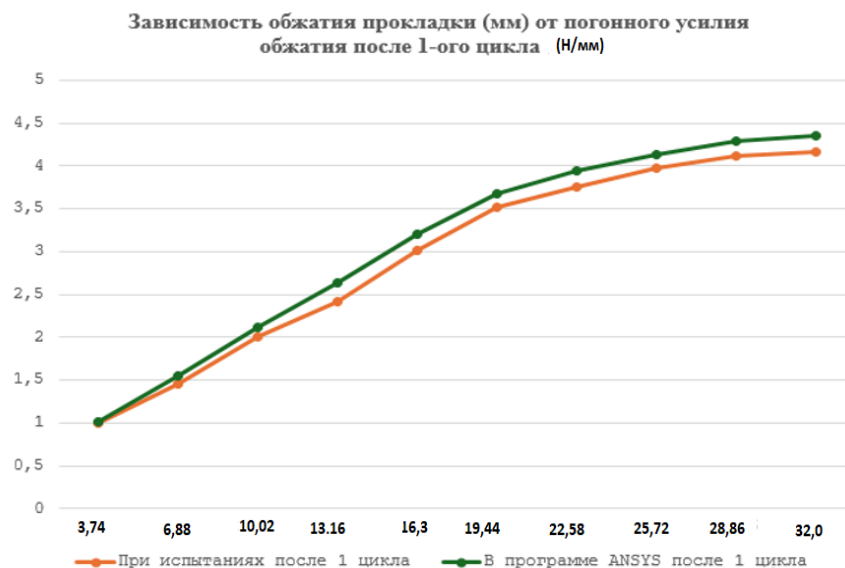


Рисунок 9. Сравнение результатов [составлено авторами]
Figure 9. Comparison of results [compiled by the authors]

Выводы

1. Результаты выполненного расчетно-экспериментального обоснования работоспособности уплотнений элементов ЛСБ показали, что зависимость величины прожатия уплотнения от заданной нагрузки близка к линейной, но наиболее хорошо описывается полиномом второй степени. Использование данной зависимости позволит наиболее точно определить напряженно-деформирован-

ное состояние не только узла уплотнения, но и уплотняемых элементов за счет учета уточненных усилий обжатия прокладок.

2. Предложенная авторами методика построения расчетной модели уплотнения позволяет получить корректную модель, так как полученные результаты зависимости величины прожатия от заданной нагрузки по программе ANSYS достаточно хорошо совпадают с экспериментальными данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кондаков Л.А., Голубев А.И., Овандер В.Б. [и др.]. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник. Москва: Машиностроение, 1986. 464 с. Режим доступа: <https://djvu.online/file/TG1jACnmr6duW?ysclid=lwuygt44ba690681962> (дата обращения: 15.03.2024).

Kondakov L.A., Golubev A.I., Ovander V.B. [et al]. Seals and sealing equipment: Reference books. Moscow: Mashinostroenie, 1986. 464 p., Available at: <https://djvu.online/file/TG1jACnmr6duW?ysclid=lwyugt44ba690681962> (accessed: 15.03.2024).

2. Макаров В.Г. Уплотнительные устройства. Ленинград: Машиностроение, 1973. 232 с. Режим доступа: <https://studfile.net/preview/19301162/> (дата обращения: 25.03.2024).

Makarov V.G. Sealing devices. Leningrad: Mashinostroenie, 1973. 232 p. Available at: <https://studfile.net/preview/19301162> (accessed: 25.03.2024).

3. Кузин С.А., Кравец С.Б., Парыгин Е.В., Краснокуцкий В.В. Прогнозирование работы узлов уплотнений для транспортных шлюзов энергоблоков с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 в эксплуатационных режимах. *Глобальная ядерная безопасность*. 2022;45(4):61–68 <https://doi.org/10.26583/gns-2022-04-06>

Kuzin S.A., Kravets S.B., Parygin E.V., Krasnorutsky V.V. Forecasting the operation of sealing joints of transport locks of WWER-1000 and WWER-1200 power units in operational modes. *Global Nuclear Safety*. 2022;45(4):61–68 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2022-04-06>

4. Селютин А.Д. Аппроксимация полиномов n степени методом наименьших квадратов. *Молодой ученый*. 2018;16(202):91–95. Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/202/> (дата обращения: 12.03.2024).

Selyutin A.D. Approximation of n -degree polynomials by the least squares method. *A young scientist*. 2018;16(202):91–95. Available at: <https://moluch.ru/archive/202/> (accessed: 12.03.2024).

5. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. Перевод с англ. Москва: Мир, 1985. 272 с. Режим доступа: <https://studizba.com/files/show/djvu/2333-1-dzh-teylor--vvedenie-v-teoriyu-oshibok.html> (дата обращения: 12.03.2024).

Taylor J. Introduction to the theory of errors. Translation from English. Moscow: Mir, 1985, 272 p. Available at: <https://studizba.com/files/show/djvu/2333-1-dzh-teylor--vvedenie-v-teoriyu-oshibok.html> (accessed: 12.03.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Кравец С.Б. – анализ результатов эксперимента и разработка рекомендаций;

Кузин С.А. – анализ результатов эксперимента и результатов расчета по МКЭ;

Сапельников В.М. – выполнение расчетов по МКЭ и разработка рекомендаций;

Синельщикова С.Е. – выполнение расчетов по МКЭ и разработка рекомендаций;

Поволоцкая А.А. – обработка результатов и разработка рекомендаций;

Бекетов В.Г. – анализ результатов расчета по МКЭ.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Kravets S.B. – analysis of experiment results and development of recommendations;

Kuzin S.A. – analysis of experimental results and FEM calculation results;

Sapelnikov V.M. – performing FEM calculations and developing recommendations;

Sinelshchikova S.E. – performing FEM calculations and developing recommendations;

Povolotskaya A.A. – processing of results and development of recommendations;

Beketov V.G. – analysis of calculation results using FEM.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения внешних источников финансирования.

FUNDING:

The study was carried out without external funding sources.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflicts of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Сергей Борисович Кравец, доктор технических наук, профессор, начальник отдела надежности и качества, ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8297-3102>

e-mail: kravets_sb@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Sergey B. Kravets, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of Reliability and Quality Department, National Technical Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8297-3102>

e-mail: kravets_sb@mail.ru

Сергей Алексеевич Кузин, кандидат технических наук, ведущий конструктор, АО «Атоммашэкспорт»; доцент кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7384-5827>

e-mail: KuzinSergey55@mail.ru

Вячеслав Михайлович Сапельников, кандидат химических наук, доцент кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5792-5344>

e-mail: vsapelnikov@yandex.ru

Софья Евгеньевна Синельщикова, студент кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

e-mail: VITkafAE@mephi.ru

Анастасия Александровна Поволоцкая, студент кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

e-mail: VITkafAE@mephi.ru

Владимир Георгиевич Бекетов, кандидат технических наук, доцент кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0242-6745>

e-mail: VGBeketov@mephi.ru

Sergey A. Kuzin, Cand. Sci. (Engin.), leading designer, JSC Atommasheexport; Associate Professor, Department of Nuclear Energy, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7384-5827>

e-mail: KuzinSergey55@mail.ru

Vyacheslav M. Sapelnikov, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Department of Nuclear Energy, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5792-5344>

e-mail: vsapelnikov@yandex.ru

Sofya E. Sinelshchikova, student, Department of Nuclear Energy, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

e-mail: VITkafAE@mephi.ru

Anastasia Alexandrovna Povolotskaya, student, Department of Nuclear Energy, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

e-mail: VITkafAE@mephi.ru

Vladimir G. Beketov, Cand. Sci. (Engin.), Associate Professor, Department of Nuclear Energy, Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0242-6745>

e-mail: VGBeketov@mephi.ru

Поступила в редакцию 28.03.2024

После доработки 03.06.2024

Принята к публикации 11.06.2024

Received 28.03.2024

Revision 03.06.2024

Accepted 11.06.2024