

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.039.524.44 : 62-762.4
DOI 10.26583/gns-2022-04-06
EDN HAAEMH

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАБОТЫ УЗЛОВ УПЛОТНЕНИЙ ДЛЯ
ТРАНСПОРТНЫХ ШЛЮЗОВ ЭНЕРГБЛОКОВ С ВВЭР-1000
И ВВЭР-1200 В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМАХ**

© 2022 Кузин Сергей Алексеевич¹, Кравец Сергей Борисович²,
Парыгин Евгений Владимирович³, Краснокутский Виктор Викторович⁴

¹АО «Атоммашэкспорт», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

²ФБУ «Национально-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Россия

^{1,3,4}Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

¹KuzinSergey55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7384-5827>

²kravets_sb@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8297-3102>

³VITkafAE@mephi.ru

⁴leronil@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4498-2996>

Аннотация. Актуальность данной работы определена необходимостью прогнозировать работу узлов уплотнений для транспортных шлюзов энергоблоков с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 в эксплуатационных режимах. Приведены результаты испытаний резиновых уплотнений на герметичность. На основании исследования выполнена оценка герметичности применяемых резиновых уплотнений и разработаны рекомендации по увеличению надежности работы узлов уплотнений для транспортных шлюзов энергоблоков с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 в эксплуатационных режимах.

Ключевые слова: ВВЭР-1000, шлюз, резиновые уплотнения, узел, эксплуатационные режимы.

Для цитирования: Кузин С.А., Кравец С.Б., Парыгин Е.В., Краснокутский В.В. Прогнозирование работы узлов уплотнений для транспортных шлюзов энергоблоков с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 в эксплуатационных режимах // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 4(45). – С. 61–68. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-04-06>.

Поступила в редакцию 20.09.2022

После доработки 29.11.2022

Принята к печати 06.12.2022

В настоящее время для транспортных шлюзов энергоблоков с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 [1-2] преимущественно используются уплотнения, выполненные из резинотехнических изделий в радиационнотстойком исполнении и предназначенные для эксплуатации на объектах атомной энергетики [3-4] в условиях воздействия температур от минус 70⁰С до плюс 200⁰С по ТУ 38 1051325-2008. В конструкции шлюза должно быть предусмотрено разделительное устройство, отделяющее межбололочное пространство от помещения транспортного шлюза. Допускаемые утечки в атмосферу, минуя фильтры очистки, через уплотнения ворот шлюза, находящегося в положении «шлюз герметичен, исправен», при любых режимах, не должны превышать 0,1 м³/сут.

Допускаемые утечки через разделительное устройство, обеспечивающее уплотнение шлюза с наружной оболочкой, не должны превышать $6,0 \text{ м}^3 / \text{сут}$ при перепаде давления 100 Па. Конструкция ворот шлюза должна предусматривать возможность контроля на герметичность с внешней стороны по отношению к зоне локализации аварии. Такой контроль на герметичность должен проводиться после каждого цикла «открытие-закрытие». Кроме того, должна быть предусмотрена возможность включения режима проверки герметичности с пульта в негерметичном помещении.

С целью прогнозирования работоспособности и герметичности уплотнений, выполненных из резинотехнических изделий в радиационнстойком исполнении из смеси резиновой 51-1758 Рад по ТУ 1051325-2008, использованных для шлюзов Нововоронежской АЭС-2, ОАО «ВНИИАМ» г. Волгодонска были проведены экспериментальные исследования. Работы проводились в соответствии с договором между ОАО «ВНИИАМ» и ЗАО «АЭМ-технологии» и протоколом «О применении на транспортном шлюзе для НВАЭС-2 уплотнений из смеси резиновой 51-1758 по ТУ 1051325-2008» на стенде экспериментальной базы ОАО «ВНИИАМ».

Номенклатура экспериментальных уплотнительных прокладок приведена на рисунках 1 и 2 по ТУ 1051325-2008.

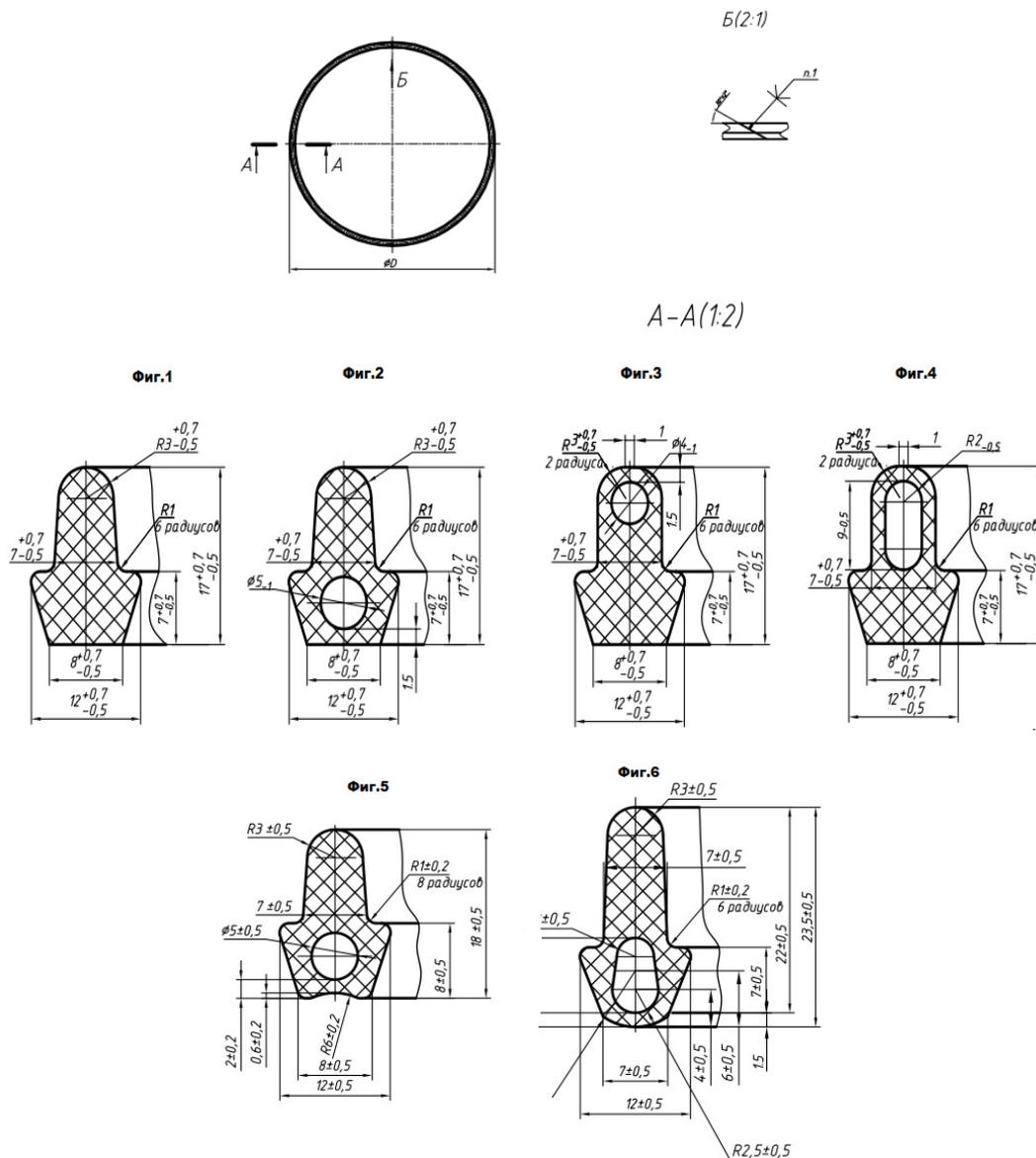


Рисунок 1 – Уплотнения (профили: фиг. 1 – фиг. 6), изготовленные ООО «Атомсинтез» [Seals (profiles: Fig. 1 to Fig. 6) manufactured by Atomsintez Ltd]

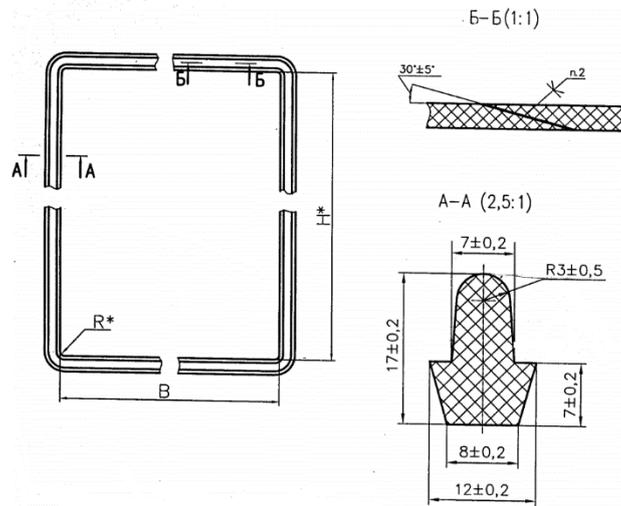


Рисунок 2 – Уплотнение, поставленное ОАО НИИЭМИ [Seal supplied by JSC SRIEMI]

Конструкция прижимных планок, приведена на рисунке 3, испытательной матрицы – на рисунке 4 [5-8].

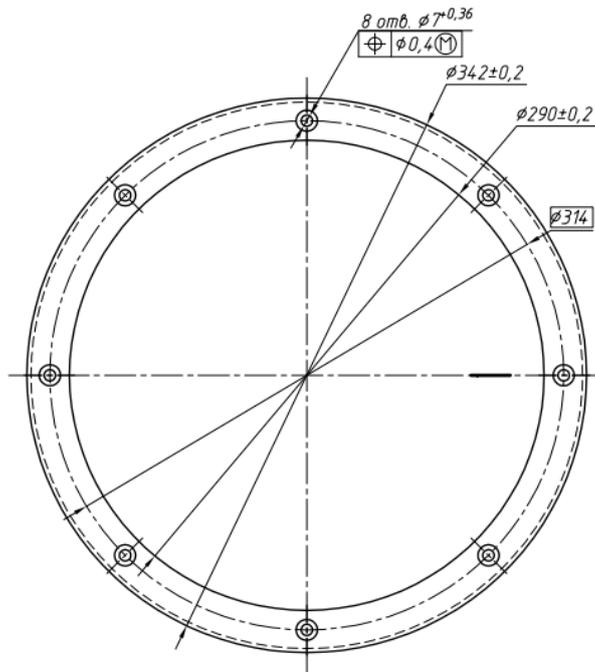


Рисунок 3 – Планка (Кольцо) [Bar (Ring)]

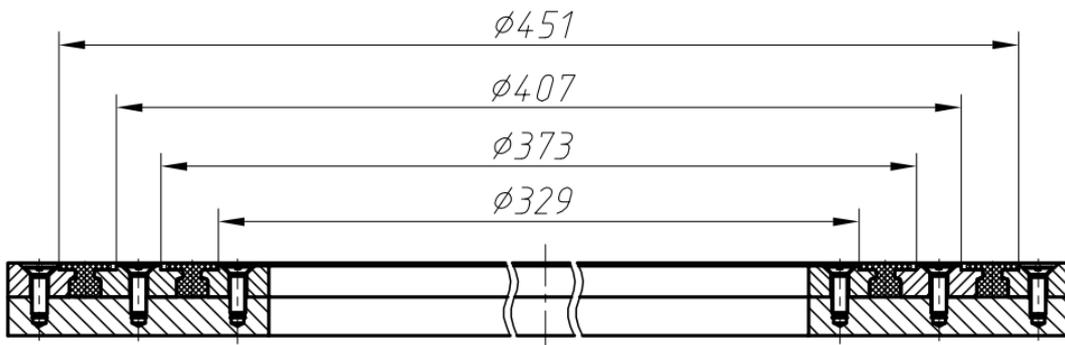


Рисунок 4 – Испытательная матрица [Test matrix]

Для проведения испытаний отобраны и изготовлены профили (см. рис. 1). Уплотнения изготовлены ООО «Атомсинтез». Работа проводилась в соответствии с программой: Резиновые уплотнения оборудования герметичного ограждения АЭС. Программа и методика испытаний АКЦШ 766.00.000 ПМ. Обобщенные результаты испытаний на герметичность уплотнений, изготовленных из различных профилей, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Обобщенные результаты испытаний на герметичность уплотнений из различных профилей (см. рис. 1) [Summarised leakage test results for seals made of different profiles (see figure 1)]

№ пп	Тип прокладки	Диапазон прожатия от нагрузки 0 – 3280 кгс, <u>общий диапазон</u> зона герметичности, мм	Величина протечки за 100 с при перепаде $\Delta P=0,4$ МПа, Па	Допустимое значение протечки за 100 с, Па	Заключение о герметичности	Примечание	
1	См. рис. 1, фиг.1	$\frac{0-3,2}{1,89-3,2}$	80 – 40	≤ 500 Па*	Соответствует предъявляемым требованиям	Прокладки устанавливались на герметик	
2	См. рис. 1, фиг. 2	$\frac{0-3,75}{1,96-3,75}$	120 – 40	≤ 500 Па*	Соответствует предъявляемым требованиям		
3	См. рис. 1, фиг. 3	$\frac{0-3,26}{2,99-3,26}$	240 – 100	≤ 500 Па*	Соответствует предъявляемым требованиям		
4	См. рис. 1, фиг. 4	$\frac{0-3,17}{2,3-3,17}$	80 – 50	≤ 500 Па*	Соответствует предъявляемым требованиям		
5	См. рис. 1, фиг. 5**	$\frac{0-4,9}{1,9-4,9}$	160 – 70	≤ 500 Па*	Соответствует предъявляемым требованиям	Без использования герметика. Пазуха соединена с атмосферой двумя отверстиями $\varnothing 2$ мм	
		0 – 5,2 **	30				
6	См. рис. 1, фиг. 6*** конструкция АМЕ	$\frac{0-4,06}{-}$	Протечка 1200 – 780 Па за 30 секунд в диапазоне от 2,1мм до 4,06	≤ 500 Па*	Не соответствует предъявляемым требованиям		
Примечание:							
* – допустимая протечка ≤ 500 Па за 100 с., определена из условия максимально допустимой протечки $0,4 \text{ м}^3$ через 20 метров уплотнения шлюза за сутки.							
** – усилие для полного обжатия (контакт металл-металл) прокладки превышало $P=3280$ кгс.							
*** – фактический диаметр центрального отверстия составил $\varnothing 2,2$ мм, вместо минимального предусмотренного чертежом отверстия $\varnothing 4$ мм.							

По результатам испытаний на герметичность принято решение о проведении испытаний на работоспособность при циклическом нагружении усилием 2886 кгс двух конструкций уплотнений (1 – см. рис. 1, фиг. 5; 2 – рис. 2). Результаты проверки работоспособности прокладки 1 после наработки 2500, 5000, 7500 и 10000 циклов нагружения представлены в таблице 2, а прокладки 2 после наработки 2500, 5000 циклов нагружения представлены в таблице 3.

Таблица 2 – Результаты испытаний прокладки 1 на работоспособность и герметичность [Results of function and tightness tests of gasket 1]

1	Обжатие прокладки, мм	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
Усилие обжатия										
2	Усилие обжатия проектной прокладки на 1 п/метр уплотнения, кгс	160	310	470	650	910	1250	1800	-	-
3	Усилие обжатия испытуемой прокладки на 1 п/метр уплотнения, кгс	147	297	463	646	856	1083	1388	1698	2061
4	Показатели по п.3 после 2500 циклов	137	275	423	579	765	996	1256	1576	2119
5	Показатели по п.3 после 5000 циклов	135	270	431	609	808	991	1279	1632	2246
6	Показатели по п.3 после 7500 циклов	144	288	428	576	765	956	1278	1482	1916
7	Показатели по п.3 после 10000 циклов	135	270	421	580	822	933	1190	1505	1989
Герметичность (Допустимая протечка ≤ 500 Па за 100 сек)										
8	Герметичность за 100 сек, Па	негерм. м.	негерм. м.	негерм. м.	160	140	110	80	70	70
9	Показатели по п.8 после 2500 циклов (герметичн.)	негерм. м.	негерм. м.	негерм. м.	130	100	70	50	50	50
10	Показатели по п.8 после 5000 циклов (герметичн.)	негерм. м.	негерм. м.	негерм. м.	150	150	100	80	80	70
11	Показатели по п.8 после 7500 циклов (герметичн.)	негерм. м.	негерм. м.	негерм. м.	160	100	90	90	90	70

Таблица 3 – Результаты испытаний на работоспособность прокладки 2 (с герметиком) [Test results of gasket 2 (with sealant)]

Усилие обжатия, кгс	Исходное состояние		После наработки 2500 циклов		После наработки 5000 циклов	
	Обжатие, мм	Протечки, Па	Обжатие, мм	Протечки, Па	Обжатие, мм	Протечки, Па
374	0,99	негерм. >500 Па	0,9	негерм. >500 Па	0,91	негерм. >500 Па
688	1,45	негерм. >500 Па	1,39	негерм. >500 Па	1,54	40
1002	2,0	40	1,99	50	2,21	40
1316	2,42	40	2,33	40	2,45	40
1630	3,01	30	2,82	40	2,81	50
1944	3,52	30	3,0	40	3,07	30
2258	3,76	30	3,21	40	3,24	30
2572	3,97	20	3,43	40	3,45	40
2886	4,11	20	3,7	30	3,64	30
3200	4,17	20	3,75	30	3,71	30

Узел уплотнения разделительного устройства для шлюза современного блока с ВВЭР-1000 показан на рисунке 4.

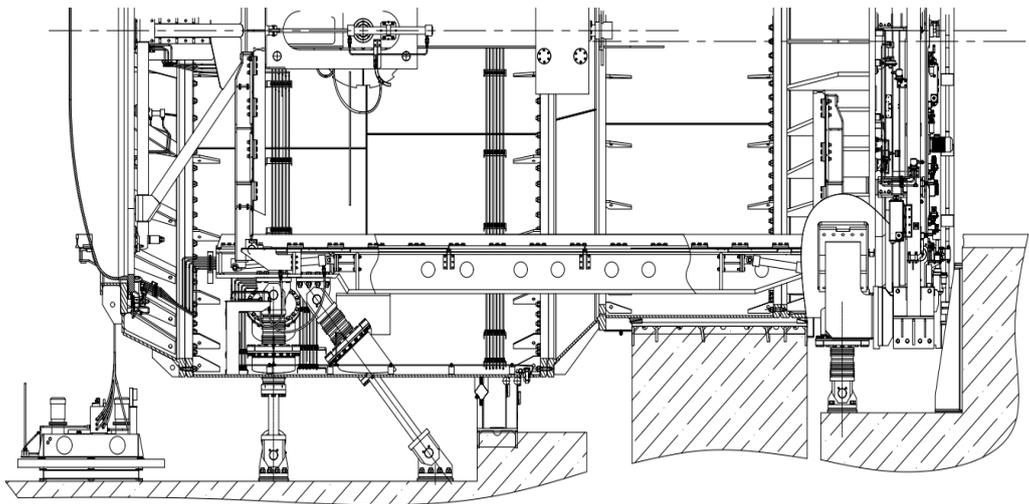


Рисунок 4 – Узел разделительного устройства шлюза [Gateway separator unit]

Резиновые уплотнения в районе узла уплотнения внутренних ворот и уплотнения разделительного устройства для транспортного шлюза АЭС блока с ВВЭР-1000 в режиме ЗПА должны обеспечивать герметичность шлюза при температуре уплотнений не более 200°C.

Данное требование проверяется в районе узла уплотнения внутренних ворот и уплотнения разделительного устройства для транспортного шлюза АЭС блока с ВВЭР-1000 в режиме ЗПА. В режиме ЗПА подразумевается разрыв с двусторонним истечением теплоносителя из ГТЦ с наложением полного обесточивания и отказом ГЕ-2. При анализе этой аварии важны результаты испытаний по усилию обжатия резиновых уплотнений.

Выводы:

1. Усилие обжатия прокладки 1 (см. рис. 1, фиг. 5) ниже значений усилия для проектной прокладки при одинаковых величинах обжатия.

2. После наработки 10000 циклов нагружения упругие свойства прокладки (см. рис. 1, фиг. 5) сохранились (величины прожатия прокладки от заданной нагрузки остались практически неизменными). Видимых повреждений и нарушений целостности прокладки не обнаружено. Прокладка сохранила способность обеспечивать герметичность в диапазоне обжатия определенном до циклической наработки.

3. После наработки 5000 циклов нагружения упругие свойства прокладки 2 (см. рис. 2) сохранились (с использованием герметика). Видимых повреждений и нарушений целостности прокладки не обнаружено. Прокладка сохранила способность обеспечивать герметичность в диапазоне обжатия определенном до циклической наработки.

4. На основании результатов испытаний для транспортных шлюзов энергоблоков с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 рекомендуются к применению уплотнения, выполненные в виде профиля 1 (см. рис. 1, фиг. 5) с диаметром отверстия $\varnothing 2,2$ мм из смеси резиновой 51-1758 Рад по ТУ 1051325-2008.

5. Данные результаты испытаний уплотнений можно использовать при проектировании шлюза, получения напряженно-деформированного состояния шлюза в эксплуатационных режимах и показателей надежности с учетом прогнозируемых циклических и температурных нагрузок на конструкции уплотнительных узлов шлюза [9-14].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. Основные положения НП-001-15.* – URL : <http://www.seogan.ru/np-001-15-obshie-polozheniya-obespecheniya-bezopasnosti-atomnix-stancii.html>.
2. *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г-7-002-86.* – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
3. *Уплотнения и уплотнительная техника: справочник* / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.Б. Овандер [и др.]; под общ. ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. – Москва : Машиностроение, 1986. – 464 с.
4. *Макаров, В.Г. Уплотнительные устройства* / В.Г. Макаров. – Ленинград : Машиностроение, 1973. – 232 с.
5. *ГОСТ 15.309-98 СРПП. Система разработки и постановки продукции на производство. Испытания и приемка. Основные положения.* – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1999.
6. *СПАС-03. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций.* – Москва : НТЦ ЯРБ, 2003.
7. *ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия.* – Москва : Стандартиформ, 2010.
8. *ГОСТ 2.601-2006. Единая система конструкторской документации. Эксплуатационные документы.* – Москва : Стандартиформ, 2008.
9. *Данюшевский, И.А. Об оценке прочности и ресурса энергооборудования с позиций современных возможностей* / И.А. Данюшевский, Е.В. Георгиевская, С.Н. Гаврилов, Л.Д. Власова // *Надежность и безопасность энергетики.* – 2017. – Т. 10, № 3. – С. 237-242. – URL : <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2017-10-3-237-242>.
10. *Гаев, А.В. Разработка методики оценки надежности и безопасности тепломеханического оборудования* / А.В. Гаев, И.А. Данюшевский, Р.Э. Шевчук, Д.Н. Журавлев // *Надежность и безопасность энергетики.* – 2015. – № 2. – С. 65-69.
11. *Клемин, А.И. Инженерные вероятностные расчеты при проектировании ядерных реакторов* / А.И. Клемин. – Москва : Атомиздат, 1973. – 304 с.
12. *Надежность машин Т IV-3* / В.В. Клюев, В.В. Болотин, Ф.Р. Соснин [и др.]; под общ. ред. В.В. Клюева. – Москва : Машиностроение, 2003. – 592 с.
13. *Семенов, В.К. К вопросу прогнозирования ресурса теплоэнергетического оборудования тепловых и атомных электрических станций* / В.К. Семенов, В.П. Дерий, В.С. Щербнев, В.Ф. Степанов // *Вестник ИГЭУ.* – 2007. – № 2. – С. 30-33.
14. *РБ-100-15. Рекомендации по порядку выполнения анализа надежности систем и элементов атомных электростанций важных для безопасности и их функций.* – Москва : НТЦ Промбезопасность, 2016.

REFERENCES

- [1] *Obshchie polozheniya obespecheniya bezopasnosti atomnyh stancij. Osnovnye polozheniya NP-001-15* [General Provisions for Ensuring the Safety of Nuclear Power Plants. Basic Provisions NP-001-15], URL: <http://www.seogan.ru/np-001-15-obshie-polozheniya-obespecheniya-bezopasnosti-atomnix-stancii.html> (in Russian).
- [2] *Normy rascheta na prochnost' oborudovaniya i truboprovodov atomnyh energeticheskikh ustanovok PNAE G-7-002-86* [Strength Calculation Standards for Equipment and Pipelines of Nuclear Power Installations PNAE G-7-002-86]. Moscow: Energoatomizdat, 1989, 525 p. (in Russian).
- [3] *Kondakov L.A., Golubev A.I., Ovander V.B. Uplotneniya i uplotnitel'naya tekhnika: Spravochnik* [Seals and Sealing Technology: Handbook], edited by Golubev A.I., Kondakov L.A. Moscow: Mechanical Engineering, 1986, 464 p. (in Russian).
- [4] *Makarov V.G. Uplotnitel'nye ustrojstva* [Sealing Devices]. Leningrad: Mechanical Engineering, 1973, 232 p. (in Russian).
- [5] *GOST 15.309-98 SRPP. Sistema razrabotki i postanovki produkcii na proizvodstvo. Ispytaniya i priemka. Osnovnye polozheniya* [STATE STANDARD 15.309-98 SRPP. System Of Product Development and Launching into Production. Testing and Acceptance. General Provisions]. Moscow. IPK Publishing Standards, 1999 (in Russian).
- [6] *SPAS-03. Sanitarnye pravila proektirovaniya i ekspluatatsii atomnyh stancij* [SPAS-03. Sanitary Rules for the Design and Operation of Nuclear Power Plants]. Moscow: NRS STC, 2003 (in Russian).
- [7] *GOST 15150-69. Mashiny, pribory i drugie tekhnicheskie izdeliya* [STATE STANDARD 15150-69. Machines, Appliances and Other Technical Products]. Moscow: Standardinform, 2010 (in Russian).

- [8] GOST 2.601-2006. Edinaya sistema konstruktorskoj dokumentacii. Eksploatacionnye dokumenty. Sb. GOSTov [STATE STANDARD 2.601-2006. Unified System for Design Documentation. Operational Documents. Collection of State Standards]. Moscow: Standardinform, 2008 (in Russian).
- [9] Danyushevskij I.A., Georgievskaya E.V., Gavrilov S.N., Vlasova L.D. Ob ocenke prochnosti i resursa energooborudovaniya s pozicij sovremennyh vozmozhnostej. [Assessment of the Durability and Service Life of Energy Equipment from the Perspective of Current Capabilities], *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki* [Reliability and Safety in Power Engineering], 2017, vol. 10, no. 3, pp. 237-242, URL: <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2017-10-3-237-242> (in Russian).
- [10] Gaev A.V., Danyushevskij I.A., Shevchuk R.E., Zhuravlev D.N. Razrabotka metodiki ocenki nadezhnosti i bezopasnosti teplomekhanicheskogo oborudovaniya [Development of Methodology for Assessing the Reliability and Safety of Thermal-Mechanical Equipment], *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki* [Reliability and Safety in Power Engineering], 2015, no. 2, pp. 65-69 (in Russian).
- [11] Klemin A.I. Inzhenernye veroyatnostnye raschety pri proektirovanii yadernyh reaktorov [Engineering Probabilistic Calculations in Nuclear Reactor Design]. Moscow: Atomizdat, 1973, 304 p. (in Russian).
- [12] Klyuev V.V., Bolotin V.V., Sosnin F.R. Nadezhnost' mashin. T IV-3 [Machine Reliability. T IV-3], edited by Klyuev V.V. Moscow: Mechanical Engineering, 2003, 592 p. (in Russian).
- [13] *Semenov, V.K.* K voprosu prognozirovaniya resursa teploenergeticheskogo oborudovaniya teplovyh i atomnyh elektricheskikh stancij [The Forecasting of the Service Life of Thermal Power Equipment in Thermal and Nuclear Power Plants], *Vestnik IGEU* [Bulletin of Ivanovo State Energy University], 2007, № 2, pp. 30-33 (in Russian).
- [14] RB-100-15. Rekomendacii po poryadku vypolneniya analiza nadezhnosti sistem i elementov atomnyh elektrostancij vazhnyh dlya bezopasnosti i ih funkcij [RB-100-15. Recommendations on How to Perform a Reliability Analysis of Safety-Relevant Systems and Components of Nuclear Power Plants and Their Functions]. Moscow: STC Promsobesnost, 2016 (in Russian).

Forecasting the Operation of Sealing Joints of Transport Locks of WWER-1000 and WWER-1200 Power Units in Operational Modes

Sergei A. Kuzin¹, Sergei B. Kravets², Evgeny V. Parygin³, Viktor V. Krasnokutsky⁴

¹JSC «Atommasheksport», Karl Marx Avenue, 44, Volgogradsk, Russia 347360

²Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (SEC NRS), Malaya Krasnoselskaya St., 2/8, bld.5, Moscow, Russia 107140

^{1,3}Volgogradsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Lenin St., 73/94, Volgogradsk, Rostov region, Russia 347360

¹KuzinSergey55@mail.ru; ORCID iD: 0000-0002-7384-5827

²kravets_sb@mail.ru; ORCID iD: 0000-0001-8297-3102; WosResearcher ID: F-7817-2017

³VITikafAE@mephi.ru

⁴leronil@mail.ru; ORCID iD: 0000-0002-4498-2996

Received by the editorial office on 09/20/2022

After revision on 11/29/2022

Accepted for publication 12/06/2022

Abstract. The relevance of this work is determined by the need to predict the operation of sealing joints of transport locks of WWER-1000 and WWER-1200 power units in operational modes. The results of tests of rubber seals for tightness are given. Based on the study, the tightness of the rubber seals used was assessed and recommendations are developed to increase the reliability of the sealing joints of transport locks of WWER-1000 and WWER-1200 power units in operational modes.

Keywords: WWER-1000, airlock, rubber seals, joint, operating modes.

For citation: Kuzin S.A., Kravets S.B., Parygin E.V., Krasnokutsky 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. Vol. 4(45). P. 61-68. <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2022-04-06>