

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-346-355

ADVANCEMENT OF LEAKAGES TESTING TECHNOLOGY FOR TESTING REACTOR CONTAINMENTS OF NEW ATOMIC VESSELS

V. V. Veselkov¹, V. P. Rydlovsky², V. V. Shtayts²

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

² — JSC «Shipbuilding and Shiprepair Technology Center»,
St. Petersburg, Russian Federation

For safe operation of atomic icebreakers, one of the most important attributes is radiation and nuclear safety. In case of maximum design accident, radioactive emission in environment shall be limited to requirements, set in vessel design. Leakage degree of reactor containments of Russian and foreign atomic objects is specified by parameter called Permissible relative leak rate of test medium (air) at peak pressure of emergency medium. The achieved relative rate of leakage of protective shells of reactor compartments of icebreakers is 50 times worse than Russian nuclear power plants, and 100 times worse than the best foreign nuclear facilities. For the first time in the history of Russian shipbuilding reactor containments of new atomic icebreakers shall be tested with excessive pressure, that exceeds existing values (0.4 MPa instead of 0.1 MPa) in 4 times, and permissible relative leak rate shall be reduced in 25 times (in accordance with requirements of Russian Maritime Register of Shipping). Due to the above, increase of air relative leak rate detection threshold (i.e. increasing sensitivity of leakage monitoring) and automation of trials of reactor containments of new atomic icebreakers and other floating structures are now becoming an actual task. This article describes ways of increasing sensitivity of leakage monitoring of reactor containments of atomic vessels: application of monitoring procedures involving tared leakages and calibrated holes, analysis of mathematical models of traditional monitoring procedures, use of automated leakage monitoring system.

Keywords: atomic vessel, icebreaker, leak tightness, trials, reactor compartment, reactor containment.

For citation:

Veselkov, Vjacheslav V., Vladimir P. Rydlovsky, and Valentin V. Shtayts. "Advancement of leakages testing technology for testing reactor containments of new atomic vessels." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 346–355. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-346-355.

УДК 620.165.29:629.5

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСПЫТАНИЙ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ ЗАЩИТНЫХ ОБОЛОЧЕК АТОМНЫХ СУДОВ НОВЫХ ПРОЕКТОВ

В. В. Веселков¹, В. П. Рыдловский², В. В. Штайц²

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — АО «Центр технологии судостроения и судоремонта»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

При эксплуатации атомных ледоколов одним из важнейших качеств является радиационная и ядерная безопасность. В случае максимальной проектной аварии выход радиационной среды во внешнюю среду должен быть ограничен требованиями, заданными в проекте судна. Степень герметичности защитных оболочек зарубежных и российских объектов характеризуют параметром «допустимая относительная скорость утечки массы испытательной среды (воздуха) при максимальной величине давления аварийной

среды». Достигнутая относительная скорость утечки защитных оболочек реакторных отсеков ледоколов в 50 раз хуже российских атомных электростанций и в 100 раз хуже лучших зарубежных атомных объектов. Впервые в российском судостроении защитные оболочки новых проектов атомных ледоколов должны испытываться при избыточном давлении в четыре раза выше существующих значений (0,4 МПа вместо 0,1 МПа), а допустимая относительная скорость утечки, согласно требованиям Правил Российского морского регистра судоходства, уменьшится в 25 раз. В связи с этим становится актуальной задача повышения порога чувствительности контроля относительной скорости утечки массы воздуха и автоматизации технологии испытаний защитных оболочек атомных паропроизводящих установок в процессе строительства ледоколов новых проектов и других атомных объектов морской техники. В статье описаны способы повышения чувствительности контроля герметичности защитных оболочек судов с атомными паропроизводящими установками: применение способов контроля при помощи тарированных течей и калиброванных отверстий, анализ математических моделей традиционных способов контроля, применение автоматизированной системы контроля герметичности.

Ключевые слова: атомное судно, ледокол, герметичность, испытания, реакторный отсек, защитная оболочка.

Для цитирования:

Веселков В. В. Совершенствование технологии испытаний на герметичность защитных оболочек атомных судов новых проектов / В. В. Веселков, В. П. Рыдловский, В. В. Штайц // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 346–355. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-346-355.

Введение (Introduction)

Защитные оболочки (ЗО), ограждающие атомные паропроизводящие установки (АППУ) судов, являются одним из важнейших барьеров защиты окружающей среды от источников радиоактивных загрязнений, возникающих как при нормальной эксплуатации АППУ, так в случае возможных аварийных ситуаций. ЗО является локализирующей системой для герметизированных помещений, в которых располагаются реактор и содержащие радиоактивные вещества системы и элементы АППУ. При этом ЗО включает реакторную выгородку (аппаратное помещение) прочного исполнения и систему ее / его осушения, снижения в ней / нём давления, очистки воздуха, обеспечивающую предотвращение или ограничение выхода в реакторный отсек радиоактивных веществ и парогазовой смеси при разгерметизации первого контура реакторной установки и/или паропроводов. Поэтому высокая степень герметичности ЗО является одним из важнейших показателей экологической безопасности АППУ. Одной из задач совершенствования атомного ледокольного флота является обеспечение радиационной безопасности и достаточной степени герметичности ЗО АППУ судов, которая служит основным барьером локализации аварийной среды при максимальной проектной аварии (МПА).

Методы и материалы (Methods and Materials)

В России судостроительным заводом, специализирующимся на постройке ледоколов и судов снабжения с атомными энергетическими установками, является АО «Балтийский завод». В настоящее время на АО «Балтийский завод» заканчивается строительство плавучей атомной тепловых электростанции пр. 20870, идет строительство атомных ледоколов пр. 22220. Ведется проектирование сверхмощного атомного ледокола «Лидер».

Ледокол проекта № 22220 снабжен двумя реакторными установками, каждая из которых размещается в своей автономной ЗО. Внутренние размеры ЗО: длина 6,0 м, ширина — 6,0 м, высота — 15,5 м. Между двумя ЗО расположен коффердам шириной 1,12 м (в свету). Внутренний объем ЗО разделен на два помещения: аппаратное и реакторное. Основной объем внутри ЗО занимает аппаратное помещение, ниже которого находится реакторное (подблочное) помещение. Реакторное помещение отделено от аппаратного герметичным настилом блоков биологической защиты, расположенных ниже боковых выводов пара и питательной воды из парогенератора. Схема ЗО реакторной установки проектируемого атомного ледокола «Лидер» приведена на рис. 1 [1]. Указанная ЗО рассчитана на восприятие избыточного давления газа при 0,4 МПа.

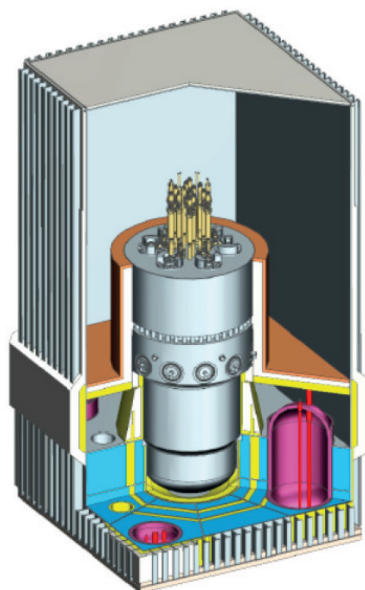


Рис. 1. Схема защитной оболочки реакторной установки

Требования к герметичности ЗО атомных судов изложены в Правилах Российского морского регистра судоходства (РС) [2], [3]. Для контроля герметичности ЗО традиционно используется манометрический способ и несколько вариантов его реализации: абсолютный способ, относительные способы, способ с термостатируемой емкостью.

Расчетные зависимости определения относительной скорости утечки L для традиционных способов контроля герметичности [4] имеют вид:

– абсолютный способ:

$$L_{AC} = \frac{2400}{\tau} \cdot \left(1 - \frac{P_1}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_1} \right); \quad (1)$$

– относительный способ 1 (эталонная емкость внутри конструкции):

$$L_{OC1} = \frac{2400}{\tau} \cdot \frac{1}{P} \cdot \left(\Delta P_1 \cdot \frac{T_0}{T_1} - \Delta P_0 \right); \quad (2)$$

– относительный способ 2 (эталонная емкость вне конструкции):

$$L_{OC2} = \frac{2400}{\tau} \cdot \left[\frac{1}{P_0} \left(\Delta P_1 \cdot \frac{T_0}{T_1} - \Delta P_0 \right) + 1 - \frac{T_0}{T_1} \cdot \frac{T_1^3}{T_0^3} \right]; \quad (3)$$

– способ с термостатируемой емкостью:

$$L_{TE} = \frac{2400}{\tau \cdot P_0} \cdot \left[P_T \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) - \Delta P \cdot \frac{T_0}{T} \right], \quad (4)$$

где P_0, P_1 — абсолютное давление воздуха в испытываемой конструкции в начале и в конце контроля; T_0, T_1 — средняя температура воздуха в испытываемой конструкции в начале и в конце контроля; T_0^3, T_1^3 — температура воздуха в эталонном сосуде в начале и в конце контроля; $\Delta P_0, \Delta P_1$ — перепад давления между эталонной емкостью и испытываемой конструкцией в начале и конце контроля; P_T — давление в термостатируемой запоминающей емкости; τ — продолжительность испытаний.

Для повышения радиационной безопасности в РС [2] было введено новое требование в п. 6.10 ч. IV «Корпус»: «Допускаемая величина относительной скорости утечки при расчетном давлении испытаний должна быть обоснована проектантом из условий радиационной безопасности с учетом действующих норм радиационной безопасности для персонала и населения.

При этом следует руководствоваться положением, что уменьшение допускаемой величины относительной скорости утечки до величины 1 % / сут и менее по сравнению с расчетной максимальной допускаемой снижает потенциальную радиационную опасность персонала и населения при МПА и поэтому должна устанавливаться из возможности её достижения и измерения».

Впервые в российском судостроении ЗО новых проектов атомных ледоколов должны испытываться при избыточном давлении в четыре раза выше существующих значений (0,4 МПа вместо 0,1 МПа), а допустимая относительная скорость утечки, согласно требованиям последней редакции правил РС по атомным судам [2], уменьшится в 25 раз и составит 1,0 % в сут. До настоящего времени испытания защитных оболочек атомных судов с такими параметрами не проводились. Данное требование привело к необходимости изменения технологии испытаний на герметичность ЗО судовых АППУ новых проектов атомных судов [5] и [6] в части увеличения чувствительности приборов контроля падения испытательного давления, дополнительного измерения температуры и влажности внутри ЗО, алгоритма обработки результатов измерений. Таким образом, становится актуальной задача повышения порога чувствительности контроля относительной скорости утечки массы воздуха до 0,2 – 0,8 % в сут.

Авторы предлагают ряд способов повышения чувствительности контроля, а именно: применение способов контроля при помощи тарированных течей и калиброванных отверстий [7], анализ математических моделей традиционных способов контроля [8], новый технологический процесс и автоматизированная система контроля герметичности защитных оболочек атомных судов, описанные в настоящей статье.

Результаты (Result)

Для повышения чувствительности испытаний к конструкции предлагается подключать по очереди две оттарированные течи с известными расходами во всем диапазоне испытательных давлений. Для каждой течи проводятся испытания до момента выполнения критериев достоверности. Расчетные формулы для натекания через дефект q_d и относительной скорости утечки L имеют следующий вид:

$$q_d = \frac{q_{\text{ТТ1}} \cdot \tau_1 - q_{\text{ТТ2}} \cdot \tau_2}{\tau_2 - \tau_1}; \quad (5)$$

$$L = \frac{8,64 \cdot 10^6 \cdot q_d}{P_0 \cdot V}, \quad (6)$$

где q_1 — натекание через первую тарированную течь; q_2 — натекание через вторую тарированную течь; ΔP — падение давления; τ_1 — время падения давления ΔP через первую тарированную течь; τ_2 — время падения давления ΔP через вторую тарированную течь; P_0 — абсолютное давление воздуха в начале испытания; V — объем конструкции.

Для разработанного способа с двумя калиброванными отверстиями герметичность конструкций по критерию f/V определяется по формуле

$$\frac{f}{V} = \frac{c}{t} \cdot \left(\Delta P_{1и} - (\Delta P_{1и} - \Delta P_{2и}) \cdot \frac{f_{k1}}{f_{k1} - f_{k2}} \right), \quad (7)$$

где f — площадь всех микронеплотностей оболочки; f_{k1}, f_{k2} — площадь калиброванных отверстий; c — коэффициент, зависящий от параметров процесса и среды истечения.

Математическое моделирование традиционных способов контроля герметичности позволяет еще на этапе разработки технологии испытаний определять важные параметры контроля — продолжительность испытаний, а также вклад погрешностей применяемых приборов в общую погрешность. Анализ разработанных математических моделей показал, что наименьшая продолжительность испытаний у относительного способа 1, наибольшая — у относительного способа 2, способы абсолютный и с термостатируемой ёмкостью имеют примерно равную продолжительность. Для всех способов контроля наименьший вклад в формирование общей погрешности ξ_L

вносят члены, связанные со временем контроля. Для обоих относительных способов и способа с термостатируемой ёмкостью несущественное влияние на величину ξ_L также оказывает погрешность измерения абсолютного давления.

При разработке автоматизированной измерительной системы контроля герметичности ЗО (АИС «Оболочка») был проведен поиск научно-технической информации, которая показала, что для испытаний ЗО энергоблоков отечественных и зарубежных АЭС на герметичность созданы автоматизированные измерительные системы [9] – [12], позволяющие передавать результаты измерений на удаленное расстояние от ЗО и обрабатывать их на компьютере в непрерывном режиме испытаний.

В АО «ЦТСС» в 2016 – 2017 гг. разработаны новый технологический процесс испытаний на герметичность ЗО, а также автоматизированная измерительная система испытаний на герметичность (АИС «Оболочка»). По сравнению с существующими методиками в разработанный алгоритм введены новые положения:

- необходимость разделения по отдельным технологическим документам испытания ЗО на прочность и герметичность;
- обоснован диапазон измерения относительной скорости утечки при заданных предельном объеме ЗО и ступенях испытательного давления;
- минимальное испытательное давление для контрольных испытаний ЗО предложено повысить с 0,15 до 0,19 МПа;
- на основании анализа результатов испытаний ЗО левого и правого борта АППУ ПЭБ предложено проводить основные испытания ЗО на одной ступени испытательного давления 0,5 МПа вместо испытаний на трех ступенях испытательного давления;
- необходимо выполнять контроль влажности в ЗО и при необходимости продувать ЗО сухим воздухом перед подъемом в ней испытательного давления;
- дополнительно к систематической погрешности учтена случайная погрешность измерения относительной скорости утечки;
- уменьшена погрешность приборов для измерения давления при основных и контрольных испытаниях ЗО до 0,01 % ВПИ, что позволит уменьшить время испытаний;
- дополнительно к критерию достоверности введены дополнительно два критерия: критерий минимально допустимого падения испытательного давления и критерий постоянства во времени относительной скорости утечки и погрешности ее измерения;
- для определения относительной скорости утечки и погрешности её измерения применяется метод наименьших квадратов, позволяющий аппроксимировать изменение во времени относительной скорости утечки;
- разработан способ определения времени температурной стабилизации, необходимого для достоверного определения относительной скорости утечки.

АИС «Оболочка» предназначена для использования в технологии испытаний на локальную и интегральную герметичность ЗО и позволяет определять относительную скорость утечки массы воздуха из ЗО объемом до 1000 м³ в диапазоне от 0,1 до 25 % / сут с погрешностью не более 30 % при испытательном давлении от $P_{02} = 0,19$ МПа до $P_{01} = 0,5$ МПа, действующем до 24 ч. Блок-схема АИС «Оболочка» приведена на рис. 2.

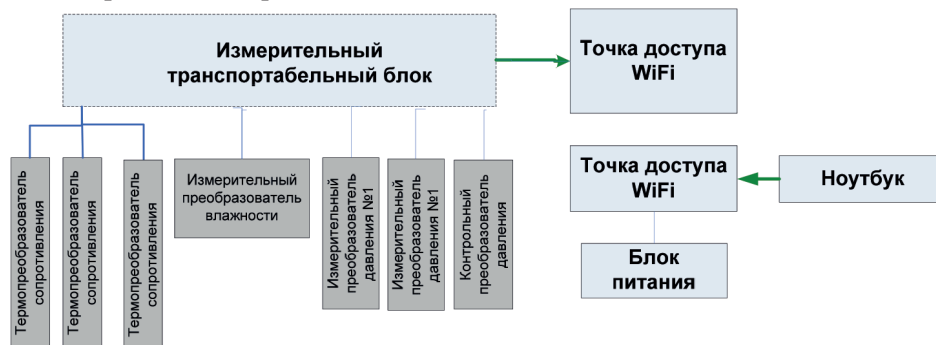


Рис. 2. Блок-схема АИС

Обсуждение (Discussion)

АИС «Оболочка» выполняет следующие основные функции:

- измеряет с помощью первичных преобразователей температуры, давления и влажности физические параметры воздуха;
- осуществляет беспроводную передачу результатов измерений на компьютер автоматизированного рабочего места (АРМ), установленного на расстоянии до 1 км от места измерений;
- представляет на мониторе компьютера текущие значения измеряемых параметров в цифровой или графической форме;
- обеспечивает регистрацию значений измеряемых параметров для формирования протоколов по ходу выполнения испытаний;
- производит расчет в реальном времени скорости относительной утечки массы воздуха по измеренным параметрам воздуха с учетом погрешности измерений;
- сохраняет результаты измерений на контроллере и компьютере АРМ;
- обеспечивает взаимодействие с архивом измерительных данных испытаний;
- документирует измеренные параметры в виде протоколов.

В АИС «Оболочка» входят следующие основные компоненты:

- первичные преобразователи (датчики);
- измерительный портативный блок (рис. 3) с точкой доступа Wi-Fi;
- АРМ на базе ноутбука с точкой доступа Wi-Fi и блоком питания (рис. 4).

Вывод измерительной и иной информации производится на экраны монитора. Ввод информации от пользователя (оператора испытаний) осуществляется посредством пользовательского интерфейса специального программного обеспечения верхнего (операторского) уровня, клавиатуры, манипулятора типа «мышь». Связь измерительного блока с компьютером АРМ осуществляется через точки доступа Wi-Fi. Измерительный блок размещается в непосредственной близости от объекта испытания. ПО разделено на два уровня: нижнее и верхнее. ПО нижнего уровня устанавливается на контроллер измерительного блока и реализует получение и регистрацию данных измерений через цифровые интерфейсы от измерительных приборов и первичных преобразователей, снабженных собственными контроллерами, например, датчик давления. ПО верхнего уровня устанавливается на компьютер АРМ и реализует функции приема данных измерений, расчет параметров и регистрацию данных на жесткий диск. ПО нижнего уровня не является метрологически значимым, так как получает данные измерений по цифровым каналам и не вносит изменений в данные.



Рис. 3. Измерительный портативный блок

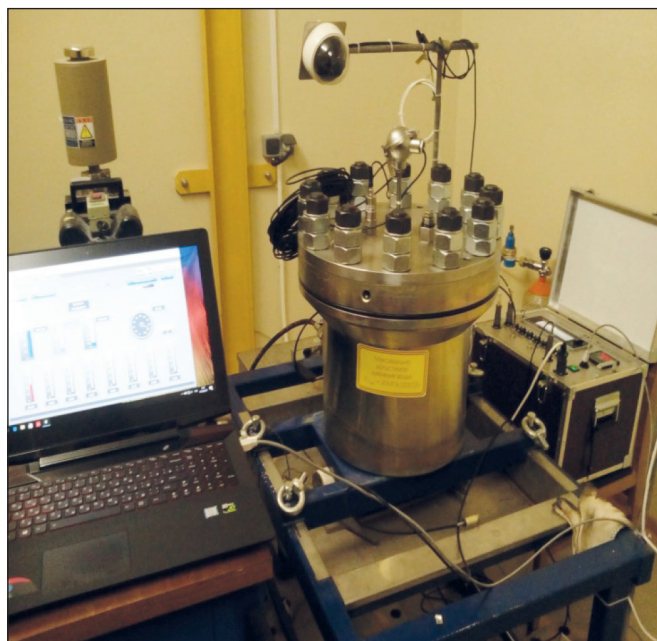


Рис. 4. АИС «Оболочка» и макет ЗО

ПО соответствует требованиям ГОСТ 19.101-77 «Единая система программной документации. Виды программ и программных продуктов». Измеренные в ходе проведения испытаний данные передаются по беспроводной или проводной сети на компьютер АРМ и хранятся на жестком диске компьютера. Контроллер измерительного блока делает резервную копию данных измерений на собственный диск. В случае сбоя связи данные измерений можно перенести на компьютер АРМ после восстановления связи.

Основные метрологические характеристики измерительных каналов АИС «Оболочка» даны в таблице.

Метрологические характеристики АИС «Оболочка»

Измеряемый параметр			Техническая характеристика	
Наименование	Номинальное значение с обозначением единиц измерения	Допуск с обозначением единиц измерения	Класс точности или погрешность	Диапазон измерений
Относительная скорость утечки воздуха из ЗО	от 0,1 до 10 % / сут	± 35 %	± 30 %	от 0,1 до 25 %/сут
Температура воздуха в ЗО (8 каналов)	от 5 °C до 40 °C	$\pm 0,2$ °C	$\pm 0,15$ °C	от 5 до 50 °C
Абсолютное давление воздуха в ЗО (измерение)	от 0,1 до 0,5 МПа от 0,1 до 0,19 МПа	± 90 Па ± 30 Па	0,01 % ВПИ	от 0 до 0,6 МПа от 0 до 0,2 МПа
Абсолютное давление воздуха в ЗО (контроль)	от 0,1 до 0,5 МПа	± 1000 Па	кл.0,15	от 0 до 0,6 МПа
Относительная влажность воздуха в ЗО	от 5 до 95 %	± 5 %	± 3 %	от 0 до 98 %

Отработка методики проводилась на пневмогидравлическом стенде (рис. 5).



Рис. 5. Пневмогидравлический стенд МТ 448.0000.00

Пневмогидравлический стенд представляет собой цельно выполненную стальную емкость объемом 25 л с крышкой, которая крепится к емкости с помощью стальных шпилек и гаек. В смежной от емкости комнате находится пульт управления стендом. Стенд позволяет создавать гидравлическое давление в емкости до 20 МПа или пневматическое давление до 0,8 МПа.

Проверка достоверности вычислений АИС «Оболочка» проводилась путем сравнения результатов вычислений относительной скорости утечки и погрешности ее измерения в процессе испытания макета ЗО с результатами вычислений этих величин по ранее отработанной программе, созданной в Excel. Испытания проводились для трех калиброванных течей: 10^{-5} , 10^{-4} и 10^{-3} Вт. Для каждой калиброванной течи испытания выполнялись при двух начальных ступенях давления: максимальной — 0,5 МПа (основные испытания ЗО) и минимальной — 0,19 МПа (контрольные испытания ЗО). Перед началом испытаний каждая течь проходила дополнительную калибровку. Значения относительной скорости утечки и погрешности ее измерения, полученные с помощью АИС «Оболочка», сравнивались с аналогичными значениями, полученными расчетом в программе Excel, что показало практически полное их совпадение. Это говорит о том, что программное обеспечение АИС «Оболочка» позволяет достоверно вычислить значение относительной скорости утечки и соответствует заданному алгоритму расчета.

Заключение (Conclusion)

ЗО реакторных отсеков атомных судов являются одними из наиболее сложных судостроительных конструкций для испытаний на герметичность. Для повышения чувствительности контроля предложен ряд способов: применение способов контроля при помощи тарированных течей и калиброванных отверстий, анализ математических моделей традиционных способов контроля, новый технологический процесс и автоматизированная система контроля герметичности защитных оболочек атомных судов. Новая технология позволяет обеспечить требуемые параметры испытаний, имеет согласование с РС, свидетельство о метрологической аттестации методики измерений. На алгоритм испытаний подана заявка на изобретение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фадеев Ю. П.* РУ повышенной мощности для атомного ледокола «Лидер» / Ю. П. Фадеев, [и др.] // Труды Междунар. конф. по судостроению и океанотехнике (Санкт-Петербург, 6 – 8 июня 2016 г.). — СПб., 2016. — С. 170–173.

2. НД № 2-020101-112. Правила классификации и постройки атомных судов и плавучих сооружений. — СПб.: РМРС, 2018. — 158 с.
3. НД № 2-030101-014. Руководство по техническому наблюдению за постройкой атомных судов и плавучих сооружений, судов атомно-технологического обслуживания, изготовлением материалов и изделий. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2017. — 60 с.
4. Воронин А. И. Сравнение точности традиционных способов контроля интегральной герметичности на основе метрологического анализа и математического моделирования / А. И. Воронин, В. М. Кузавков, В. В. Штайц // Сб. матер. 5-й Международной конф. по морским интеллектуальным технологиям «Моринтех-2003». — СПб., 2003. — С. 135–138.
5. Fleckenstein T. Nuclear Power Plant Olkiluoto 3—Containment Leakage Test Under Extreme Conditions / T. Fleckenstein // *Atw. Internationale Zeitschrift fuer Kernenergie*. — 2015. — Vol. 60. — Is. 1. — Pp. 22–24.
6. Аполлова А. В. Расчет протечек воздуха через неплотности в контейнменте атомных судов / А. В. Аполлова // Тр. Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. — 2017. — № 4. — С. 3–10.
7. Пат. 2217721 Российская Федерация, МПК G 01 M 3/26, G 01 F 17/00. Способ определения объема и/или степени герметичности оболочек большого объема / А. И. Воронин, В. Д. Горбач, В. М. Кузавков, В. В. Штайц; заяв. и патентообл. Федеральное государственное унитарное предприятие Центральный научно-исследовательский институт технологии судостроения. — № 2002127697/28; Заявлено 15.10.2002; Оpubл. 27.11.2003. — Бюл. № 33.
8. Пат. 2292536 Российская Федерация, МПК G 01 M 3/26, G 01 F 17/00. Способ определения объема и/или степени герметичности замкнутой оболочки / А. И. Воронин, В. Д. Горбач, В. М. Кузавков, В. В. Штайц; заяв. и патентообл. Федеральное государственное унитарное предприятие Центральный научно-исследовательский институт технологии судостроения. — № 2005123942/28; Заявлено 27.07.2005; Оpubл. 27.01.2007. — Бюл. № 3.
9. Cho C. S. Dependability enhancement of reactor containment in safety critical nuclear power plants / C. S. Cho, W. H. Chung, D. Gao, H. Zhang, S. Y. Kuo // *Dependable Computing (PRDC)*, 2011 IEEE 17th Pacific Rim International Symposium on. — IEEE, 2011. — С. 129–134. DOI: 10.1109/PRDC.2011.24.
10. Cho C. S. Measurement and analysis of the leak tightness of reactor containment vessels: experiences and results / C. S. Cho, W. H. Chung, S. Y. Kuo // *Nuclear Engineering and Design*. — 2015. — Vol. 292. — Pp. 112–122. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2015.06.003.
11. Нефедьев Д. И. Система мониторинга состояния защитной оболочки энергоблока АЭС / Д. И. Нефедьев, М. С. Зверев, Д. А. Голованов // Датчики и системы. — 2011. — № 4. — С. 10–13.
12. Хлесткин Д. А. Испытания системы герметичных ограждений атомных электростанций на плотность / Д. А. Хлесткин. — М.: ИИКЦ «Эльф-3», 2004. — 80 с.

REFERENCES

1. Fadeev, Yu.P., et al. “RU povyshennoi moshchnosti dlya atomnogo ledokola «Lider».” *Trudy Mezhdunarodnoi konferentsii po sudostroeniyu i okeanotekhnike (Sankt-Peterburg, 6-8 iyunya 2016 g.)*. SPb., 2016. 170–173.
2. Russian Federation. Normative document ND №2-020101-112. Pravila klassifikatsii i postroiki atomnykh sudov i plavuchikh sooruzhenii. SPb.: RMRS, 2018.
3. Russian Federation. Normative document ND №2-030101-014. Rukovodstvo po tekhnicheskomu nablyudeniyu za postroikoi atomnykh sudov i plavuchikh sooruzhenii, sudov atomno-tekhnologicheskogo obsluzhivaniya, izgotovleniem materialov i izdelii. SPb.: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2017.
4. Voronin, A.I., V.M. Kuzavkov, and V.V. Shtaits. “Sravnenie tochnosti traditsionnykh sposobov kontrolya integral’noi germetichnosti na osnove metrologicheskogo analiza i matematicheskogo modelirovaniya.” *Sbornik materialov 5-i mezhdunarodnoi konferentsii po morskim intellektual’nym tekhnologiyam Morintekh-2003*. SPb., 2003. 135–138.
5. Fleckenstein, Tobias. “Nuclear Power Plant Olkiluoto 3—Containment Leakage Test Under Extreme Conditions.” *Atw. Internationale Zeitschrift fuer Kernenergie* 60.1 (2015): 22–24.
6. Apollava, A. V. “Raschet protechek vozdukha cherez nepltnosti v konteinmente atomnykh sudov.” *Trudy Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnicheskogo universiteta* 4 (2017): 3–10.

7. Voronin, A.I., V.D. Gorbach, V.M. Kuzavkov, and V.V. Shtaits. RU 2 217 721 C1, IPC G 01 M 3/26, G 01 F 17/00. Sposob opredeleniya ob'ema i/ili stepeni germetichnosti obolochek bol'shogo ob'ema. Russian Federation, assignee. Publ. 27 Nov. 2003.

8. Voronin, A.I., V.D. Gorbach, V.M. Kuzavkov, and V.V. Shtaits. RU 2 292 536 C1, IPC G 01 M 3/26, G 01 F 17/00. Sposob opredeleniya ob'ema i/ili stepeni germetichnosti zamknutoi obolochki. Russian Federation, assignee. Publ. 27 Jan. 2007.

9. Cho, Chi-Shiang, Wei-Ho Chung, Deyun Gao, Hongke Zhang, and Sy-Yen Kuo. "Dependability enhancement of reactor containment in safety critical nuclear power plants." *Dependable Computing (PRDC), 2011 IEEE 17th Pacific Rim International Symposium on*. IEEE, 2011. 129–134. DOI: 10.1109/PRDC.2011.24.

10. Cho, Chi-Shiang, Wei-Ho Chung, and Sy-Yen Kuo. "Measurement and analysis of the leak tightness of reactor containment vessels: experiences and results." *Nuclear Engineering and Design* 292 (2015): 112–122. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2015.06.003.

11. Nefed'ev, D.I., M.S. Zverev, and D.A. Golovanov. "Monitoring system of the condition of containment shell of power generating unit of nuclear power plant." *Sensors & Systems* 4 (2011): 10–13.

12. Khlestkin, D.A. *Ispytaniya sistemy germetichnykh ograzhdenii atomnykh elektrostantsii na plotnost'*. M.: PKTs «El'f-3», 2004.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Беселков Вячеслав Васильевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: inbox@sstc.spb.ru,
kaf_shipbuilding@gumrf.ru
Рыдловский Владимир Петрович —
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
АО «Центр судостроения и судоремонта»
198095, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Промышленная, 7
e-mail: rydlovskii@mail.ru
Штайц Валентин Валерьевич —
ведущий инженер технолог
АО «Центр судостроения и судоремонта»
198095, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Промышленная, 7
e-mail: shtayts_vv@sstc.spb.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Veselkov, Vyacheslav V. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: inbox@sstc.spb.ru,
kaf_shipbuilding@gumrf.ru
Rydlovsky, Vladimir P. —
PhD, Senior Researcher
JSC «Shipbuilding and Shiprepair
Technology Center»
7 Promyshlennaja Str., St. Petersburg, 198095,
Russian Federation
e-mail: rydlovskii@mail.ru
Shtayts, Valentin V. —
Leading engineer-technologist
JSC «Shipbuilding and Shiprepair Technology Center»
7 Promyshlennaja Str., St. Petersburg, 198095,
Russian Federation
e-mail: shtayts_vv@sstc.spb.ru

Статья поступила в редакцию 16 марта 2018 г.

Received: March 16, 2018.