

УДК 629.039.58+519.248

DOI: 10.46960/1816-210X_2023_3_71

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСТВОРЕНИЯ, ВЫДЕЛЕНИЯ И ПЕРЕНОСА ГАЗОВ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ПОДДЕРЖАНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ПЕРВОМ КОНТУРЕ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК

В.И. ПолуничевORCID: 0000-0003-1859-9616 e-mail: dep59@okbm.nnov.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***М.С. Кабина**ORCID: 0009-0003-8666-8203 e-mail: marinakabina99@gmail.comНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Анализируются процессы растворения, выделения и переноса газов в теплоносителе судовых реакторных установок и их влияние на точность поддержания давления в первом контуре. Исследования выполнены для режимов разогрева из различных исходных состояний установок и расхолаживания. Определены объемы растворенных и выделившихся газов и их распределения между первым контуром и системой компенсации давления, показано их влияние на изменение давления в контуре. Приведены основные параметры установок, влияющие на количество растворенного и выделившегося газа и степень его влияния на давление. Проведены оценочные расчеты процессов переноса газов для блочного и интегрированного вариантов реакторных установок. Результаты работы могут быть полезны при проектировании перспективных реакторных установок для судов и атомных станций малой мощности с длительным ресурсом, а также для обоснования их надежности.

Ключевые слова: растворение, выделение, перенос, расхолаживание реакторных установок, разогрев, газовая система компенсации давления, судовые реакторные установки, точность поддержания давления.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Полуничев, В.И. Исследование процессов растворения, выделения и переноса газов и их влияния на точность поддержания давления в первом контуре реакторных установок / В.И. Полуничев, М.С. Кабина // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 3. С. 71-81. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_3_71

INVESTIGATION OF THE PROCESSES OF DISSOLUTION, RELEASE AND TRANSFER OF GASES AND THEIR INFLUENCE ON THE ACCURACY OF MAINTAINING PRESSURE IN THE PRIMARY CIRCUIT OF REACTOR PLANTS

V.I. PolunichevORCID: 0000-0003-1859-9616 e-mail: dep59@okbm.nnov.ruNizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
*Nizhny Novgorod, Russia***M.S. Kabina**ORCID: 0009-0003-8666-8203 e-mail: marinakabina99@gmail.comNizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article presents an analysis of the processes of dissolution, emission and transfer of gases in the coolant of ship reactor units and their influence on the accuracy of maintaining pressure in the primary circuit. Studies of these processes have been carried out for heating modes from various initial states of plants and cooldown. The vol-

umes of dissolved and emitted gases and their distribution between the primary circuit and the pressure compensation system have been determined and their influence on the pressure change in the circuit has been shown. The main parameters of the reactor units that affect the amount of dissolved and emitted gas and the degree of its influence on pressure are given. Estimated calculations of gas transfer processes for block and integrated versions of reactor units have been carried out. The obtained results can be useful in the design of advanced reactor units for ships and small nuclear power plants with a long service life, as well as to justify their reliability.

Key words: dissolution, gas emission, gas transfer, cooling of the reactor, heating of the reactor, gas pressure compensation system, ship reactor installation, accuracy of pressure maintenance.

FOR CITATION: V.I. Polunichev, M.S. Kabina. Investigation of the processes of dissolution, release and transfer of gases and their influence on the accuracy of maintaining pressure in the primary circuit of reactor plants. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 3. Pp. 71-81. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_3_71

Введение

Атомный ледокольный флот России, в состав которого входят реакторные установки (РУ) типа ОК-900 и РИТМ, обеспечивает стабильное функционирование арктической транспортной системы. Надежность этих РУ подтверждена практическим опытом их эксплуатации [1]. В настоящее время ведется строительство атомных ледоколов нового поколения, которые будут иметь более высокие технико-экономические показатели. Наиболее перспективным проектом РУ атомных ледоколов и плавучих атомных станций малой мощности в настоящее время является РИТМ. Его особенностью является интегральное исполнение парогенерирующего блока и введение в состав системы компенсации давления (СКД) гидроаккумуляторов и дополнительного объема воды для реализации безотходной технологии. Это сопряжено с повышенными объемами теплоносителя в первом контуре и СКД и соотношениями объемов воды и газа по сравнению с реакторными установками предыдущих поколений блочного типа [2]. В ходе проведения швартовых и ходовых испытаний головного универсального атомного ледокола «Арктика» имели место изменения давления в первом контуре в режимах разогрева, маневрирования мощностью, превышающие проектные, и скопление газа в оборудовании первого контура, которые практически отсутствовали в установках типа ОК-900. Потенциальными причинами изменения давления в указанных режимах могут быть изменение температуры газа в СКД, средней температуры теплоносителя в первом контуре, соотношение объемов газа в СКД и воды в первом контуре, а также растворение и выделение газа из теплоносителя. Амплитуда изменения давления зависит от номинального давления и объема газа в СКД.

Целью данной работы является исследование влияния процессов переноса, растворения и выделения газа из теплоносителя на изменение давления в первом контуре. С этой целью рассмотрены соответствующие режимы работы установок двух поколений: типа ОК-900 и РИТМ с точки зрения влияния газопереноса на давление в первом контуре в номинальных и переходных режимах. Процессы растворения, выделения и переноса газа в первом контуре РУ с газовой системой КД изучены достаточно подробно [3-5]. В основном они связаны с водно-газовым и химическим режимом теплоносителя, надежностью работы оборудования, теплогидравликой. В данной работе выполнено исследование влияния указанных процессов на давление теплоносителя в первом контуре и точность его поддержания в различных режимах, в том числе, в режимах расхолаживания и разогрева.

Режим расхолаживания РУ типа ОК-900 и РИТМ

Рассмотрим режимы нормального расхолаживания установок двух разных поколений: РУ типа ОК-900 и РИТМ. Для выполнения сравнительного анализа двух типов установок расчеты проводились при исходных данных, представленных в табл. 1.

Таблица 1.
Основные технические характеристики реакторных установок

Table 1.
Main technical characteristics of reactor units

Характеристика	РУ типа ОК-900	РУ типа РИТМ
Температура в КД, °С	50	50
Средняя температура теплоносителя 1 контура, °С	295	295
Давление 1 контура в рабочем состоянии, МПа	12,8	15,7
Давление 1 контура в расхоложенном состоянии, МПа	8,1	7,5
Объем первого контура (без КД), м ³	19	27
Рабочий объем газа в КД, м ³	8,8	7
Общий объем КД, м ³	8,3	22,9
Объем первоначальной заливки в КД, м ³	1,3	9,3
Объем газа в КД в расхоложенной РУ, м ³	13	13,6

В процессе расхолаживания температура и давление первого контура снижаются, происходит пополнение реактора водой СКД, снижаются уровень и давление при постоянной температуре. В соответствии с изменениями параметров теплоносителя меняются и равновесные концентрации растворенного газа [5]. На рис. 1 и 2 представлены зависимости концентраций азота от средней температуры первого контура в процессе расхолаживания РУ типа ОК-900 и РИТМ.

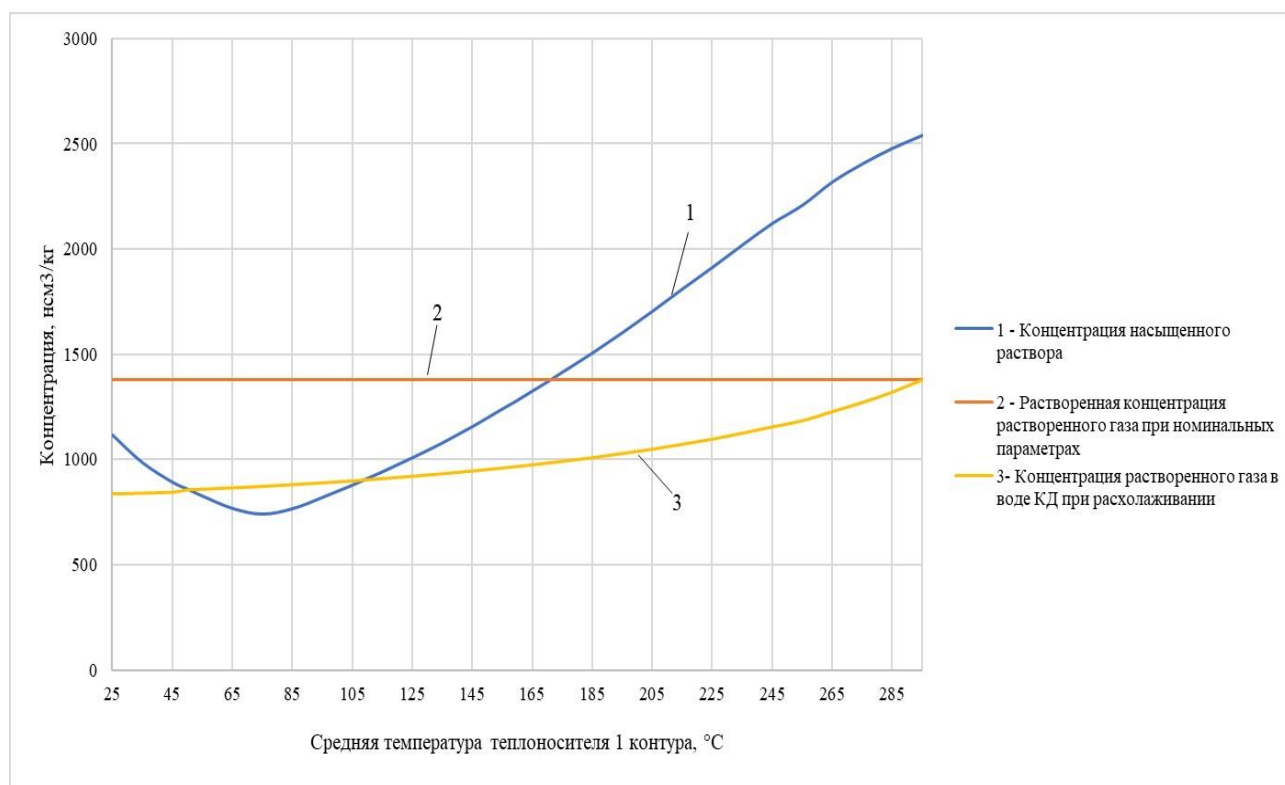


Рис. 1. Зависимость предельной концентрации газа в теплоносителе первого контура от средней температуры в процессе расхолаживания для установки типа ОК-900 [6]

Fig. 1. Dependence of the limiting gas concentration in the primary coolant on the average temperature of the primary circuit in the cooldown process for the ОК-900 reactor unit [6]

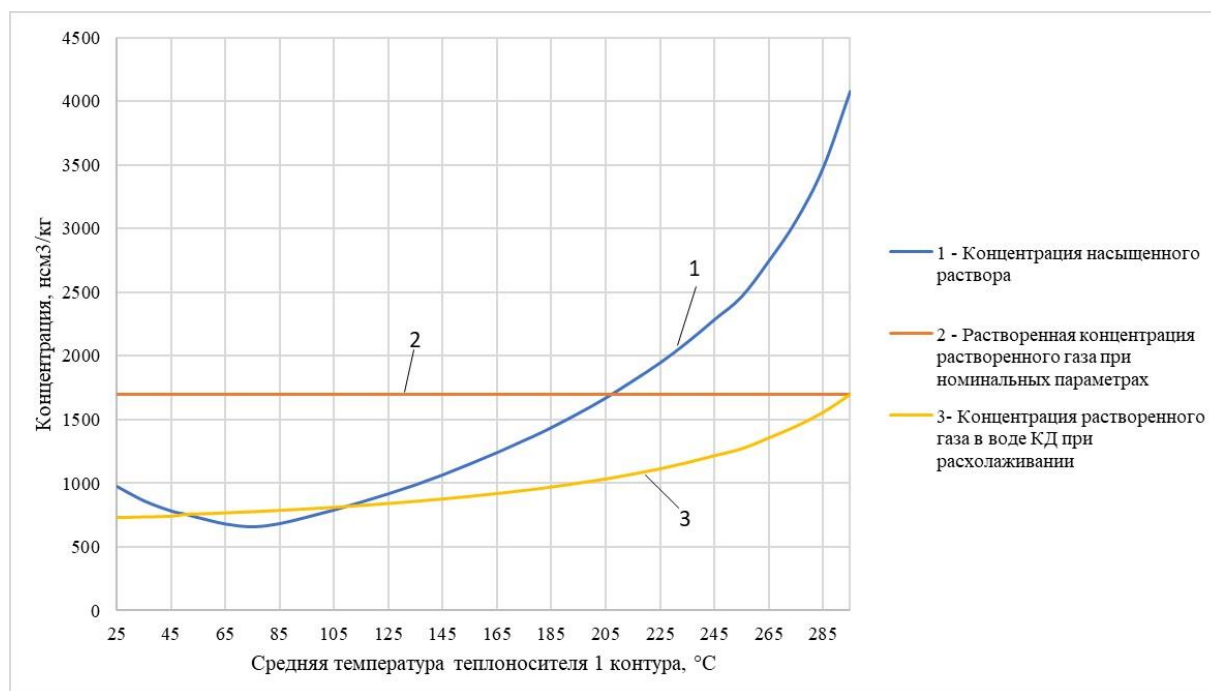


Рис. 2. Зависимость предельной концентрации газа в теплоносителе первого контура от средней температуры в процессе расхолаживания для установки типа РИТМ [6]

Fig. 2. Dependence of the limiting gas concentration in the primary coolant on the average temperature of the primary circuit in the cooldown process for the RITM reactor unit [6]

Из представленных графиков видно, что при достижении температуры 170 °С в реакторе РУ типа ОК-900 начинается процесс выделения газа, а для РУ типа РИТМ – начиная с 205 °С. При данных температурах концентрации растворенного газа в теплоносителе достигают насыщения. При дальнейшем снижении температуры начинается процесс выделения газа и продолжается до достижения температуры ~ 75 °С. Последующий процесс возможного растворения газа, выделившегося в контуре, в связи с малой скоростью протекания процесса может не учитываться. Нормальными условиями принято считать давление газа $P_0 = 101,325$ кПа и его температуру $T_0 = 293$ °С. Приведение объема газа V_0 , находящегося при нормальных условиях, к заданной температуре T (по Кельвину) и давлению P осуществляется по следующей формуле:

$$V'_0 = V_0 \frac{P_0 \cdot T}{P \cdot T_0} \quad (1)$$

Объем газа, выделившегося из исходной массы воды первого контура (без КД) в реакторе в процессе расхолаживания, определяется по следующему соотношению [5]:

$$V_{г,р} = \Delta C_{1к} \cdot G \quad (2)$$

где $\Delta C_{1к} = C_{1к}^0 - C_{1к}$ – изменение равновесной концентрации газа в исходной массе воды первого контура при расхолаживании; $C_{1к}^0$ – равновесная концентрация растворенного азота в теплоносителе первого контура перед расхолаживанием; $C_{1к}$ – равновесная концентрация газа в исходной массе теплоносителя в первом контуре в процессе расхолаживания; G – масса воды в первом контуре в рабочем состоянии РУ.

На рис. 3 представлено изменение объема выделившегося газа из исходной воды первого контура (без КД) в процессе расхолаживания РУ типа ОК-900 и РИТМ [5].

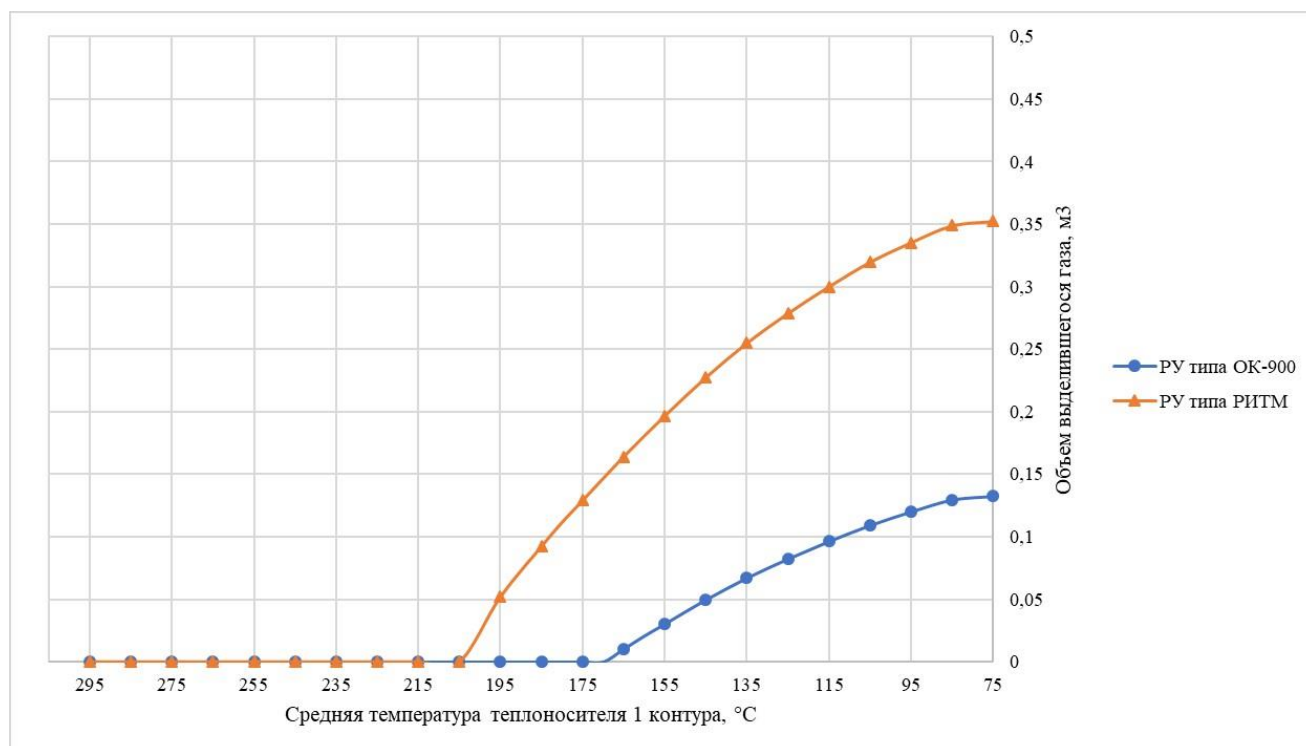


Рис. 3. Зависимость объема газа, выделившегося из исходной массы воды, в реакторе РУ типа ОК-900 и РИТМ от средней температуры первого контура в процессе расхолаживания

Fig. 3. Dependence of the volume of gas emitted from the initial mass of water in OK-900 and RITM reactor units on the average temperature of the primary circuit during cooldown

Объем газа, выделившегося из массы воды, поступившей из КД в реактор, в процессе расхолаживания определяется из следующего соотношения [5]:

$$V_{г.КД \rightarrow Р} = C_{КД \rightarrow Р} \cdot \Delta G \tag{3}$$

где $C_{КД \rightarrow Р} = \frac{C_{КД_i} + C_{КД_{i+1}}}{2}$ – средняя концентрация газа в массе воды КД, поступающей в реактор, в процессе расхолаживания; $C_{КД_i}, C_{КД_{i+1}}$ – концентрации растворенного газа в массе воды КД в процессе расхолаживания в точках i и $i+1$ соответственно (в начальный момент времени $i=0$, шаг $i=i+1$); ΔG – масса воды, перенесенная из КД в реактор.

На рис. 4 представлено изменение объема газа, выделившегося из массы воды КД, поступившей в реактор в процессе расхолаживания РУ типа ОК-900 и РИТМ.

Объем газа, выделившегося из массы воды КД, в процессе расхолаживания:

$$V_{г.КД} = C_{КД \rightarrow Р} \cdot (G_{КД} - \Delta G) \tag{4}$$

где $G_{КД}$ – масса воды в КД в рабочем состоянии.

На рис. 5 представлено изменение объема выделившегося газа в КД, в процессе расхолаживания РУ типа ОК-900 и РИТМ.

Общий объем газа, выделившегося в первом контуре в процессе расхолаживания, будет состоять из трех компонент: объем газа, выделившегося из исходной массы воды в реакторе, объема выделившегося в реакторе газа из массы воды, поступившей из КД и объема газа, выделившегося в КД.

$$V_{\Sigma г} = V_{г.Р} + V_{г.КД \rightarrow Р} + V_{г.КД} \tag{5}$$

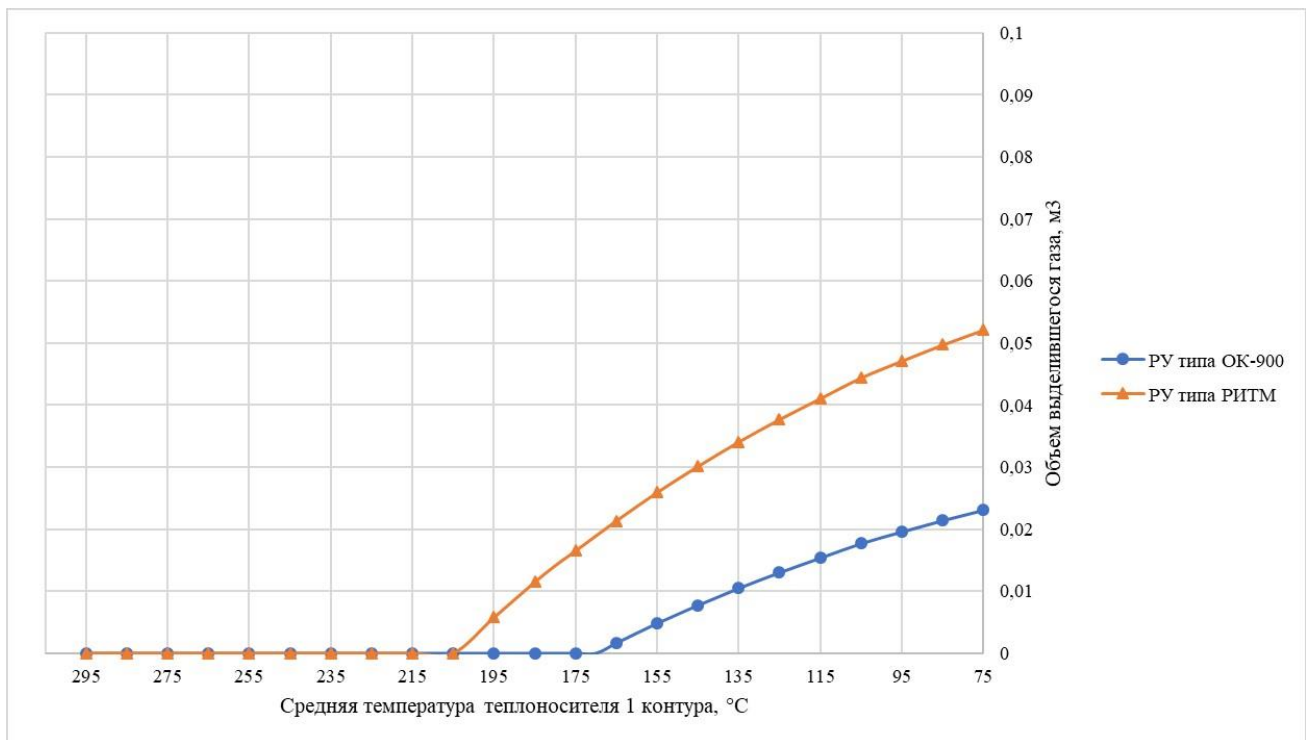


Рис. 4. Изменение объема газа, выделившегося из массы воды, поступившей из КД в реактор в процессе расхолаживания РУ ОК-900А и РИТМ-200

Fig. 4. Change in the volume of gas emitted from the mass of water supplied from the pressure compensator to the reactor in the cooldown process for the ОК-900А and RITM-200 reactor units

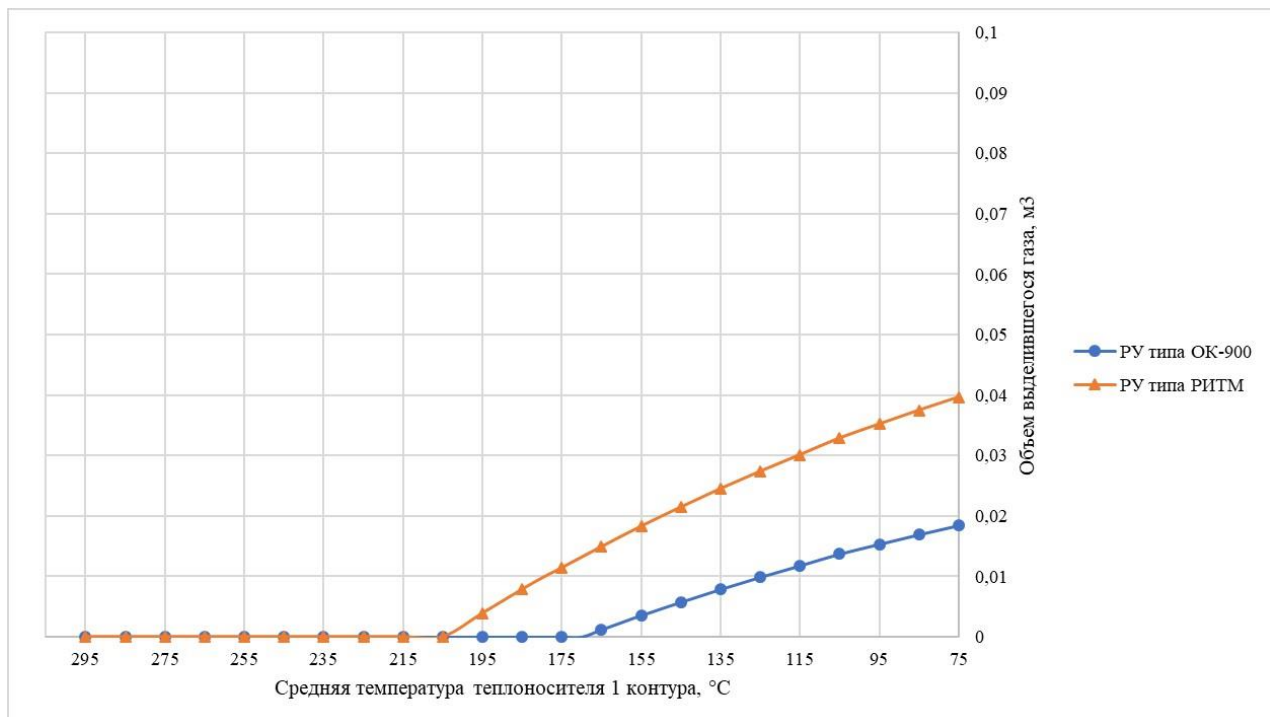


Рис. 5. Изменение объема выделенного газа в КД в процессе расхолаживания РУ типа ОК-900 и РИТМ

Fig. 5. Change in the volume of emitted gas in the pressure compensator during cooldown for the ОК-900 and RITM reactor units

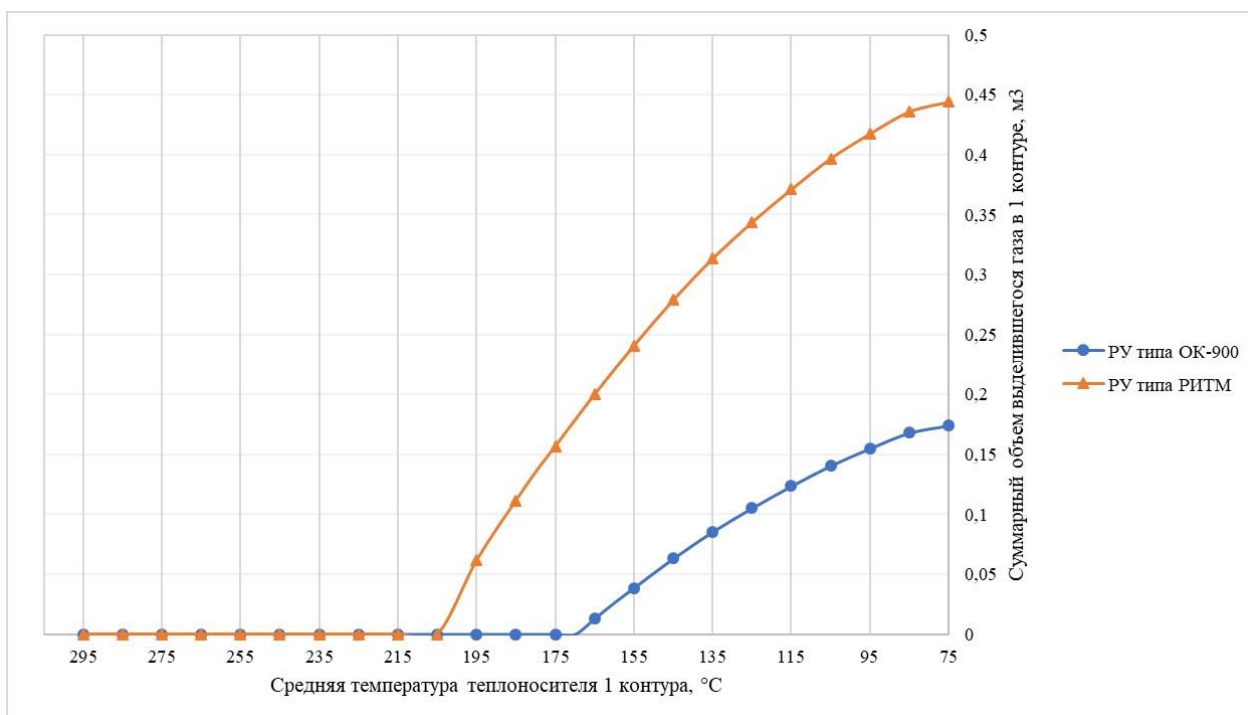


Рис. 6. Суммарный объем выделившегося газа в первом контуре РУ типа ОК-900 и РИТМ в процессе расхолаживания

Fig. 6. The total volume of emitted gas in the primary circuit during cooldown process for the OK-900 and RITM reactor units

На рис. 6 представлен график суммарного объема газа, выделившегося в первый контур. В результате выполнения расчетов и представленных выше графиков выявлено, что суммарный объем выделившегося газа в первом контуре РУ типа ОК-900 будет составлять ~ 175 л, а РУ типа РИТМ ~ 450 л, что существенно больше, чем в установках более раннего поколения типа ОК-900. Исходя из расчета, при повышении объема и давления теплоносителя первого контура объем выделившегося газа в процессе расхолаживания существенно увеличивается. С одной стороны, повышение давления благоприятно влияет на условия работы активной зоны, увеличивая запас до кипения, с другой стороны, оно негативно влияет на увеличение концентрации растворенного в теплоносителе газа, его выделения в первом контуре в переходных режимах и при расхолаживании. При этом повышается вероятность загазованности циркуляционных насосов, приводов СУЗ, переноса части газа, что влияет на надежность работы. Кроме того, растворение и выделение газа при работе РУ вызывает изменение давления в первом контуре.

Опыт эксплуатации показывает, что при работе газовой СКД на установках старого поколения существенных проблем с поддержанием давления и выделением газа в оборудовании не возникало. Следовательно, пониженное рабочее давление первого контура, меньшие объемы теплоносителя предпочтительны с точки зрения указанных параметров.

Влияние объема газа, выделившегося в первый контур в результате расхолаживания, на точность поддержания давления

Проведем анализ влияния выделившегося газа в результате расхолаживания на точность поддержания давления в первом контуре РУ типа РИТМ. Добавим к объему газа в газовой системе компенсации давления объем выделившегося газа в результате расхолаживания. С учетом новой величины газа в системе ГСКД, выполним пересчет давления первого контура в расхолаженном состоянии при $t_{1к} = 75\text{ °C}$ по следующей формуле:

$$P_{1К}^{хол'} = \frac{P_{1К}^{хол} \cdot (V_{газа в КД} + V_{\Sigma г})}{V_{газа в КД}} \quad (6)$$

где $P_{1К}^{хол'}$ – давление первого контура в расхоложенном состоянии с учетом влияния выделившегося газа; $P_{1К}^{хол}$ – давление первого контура в расхоложенном состоянии без учета выделившегося газа; $V_{газа в КД}$ – объем газа в КД в расхоложенном состоянии без учета выделившегося газа.

Увеличение давления в первом контуре по итогам учета объема выделившегося газа:

$$\Delta P = P_{1К}^{хол'} - P_{1К}^{хол} \quad (7)$$

В результате расчета было выявлено, что выделившийся объем газа в первом контуре РУ типа РИТМ, который составляет ~ 450 л, будет увеличивать давление первого контура на 2,53 бар, давление повысилось с 72 бар до 74, 53 бар. Объем газа, выделившегося в РУ типа ОК-900, который ранее был оценен в 175 л, меньше влияет на повышение давления, увеличение составило 1,1 бар. Следовательно, меньший объем выделившегося газа в процессе расхоложивания менее сильно повлияет на изменение давления и работоспособность РУ.

При работе установки необходимо обеспечивать заданную точность поддержания давления. Было выявлено, что для обеспечения более мягкого регулирования давления в установках типа ОК-900, точность поддержания должна составлять – повышение средней температуры первого контура на $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ должно приводить к изменению давления первого контура на $\Delta P = 3$ бар. При данной точности исходный объем газа в системе будет составлять $V_{г0} = 8,8 \text{ м}^3$.

Исходный объем газа можно оценить по формуле:

$$V_{г0} = \frac{\Delta V_{г} \cdot (P_{1к} + \Delta P)}{\Delta P} \quad (8)$$

где $P_{1к}$ – давление первого контура в рабочем состоянии; ΔP – изменение давления на 3 бар при условии повышения средней температуры в реакторе на 5°C ; $\Delta V_{г}$ – изменение объема газа в КД при повышении давления на ΔP .

Чем меньше объем газа, тем более жесткой является система. Введем коэффициент жесткости – параметр, характеризующий отношение изменения давления к изменению объема газа при повышении давления на ΔP и средней температуры теплоносителя в реакторе на ΔT .

$$k = \frac{\Delta P}{\Delta V_{г}} \quad (9)$$

Для установки типа ОК-900 коэффициент жесткости составит $k = 15,06 \frac{\text{бар}}{\text{м}^3}$.

В установках типа РИТМ коэффициент жесткости выше. Следовательно, работа системы компенсации характеризуется большими колебаниями давления в первом контуре. Данное явление подтверждается и опытом эксплуатации. Для приведения точности поддержания давления в первом контуре к условиям установок типа ОК-900 необходимо увеличение объема газа в системе компенсации.

На рис. 7 представлена зависимость исходного объема газа в системе КД от давления первого контура при одинаковом условии точности поддержания давления для двух рассматриваемых проектов.

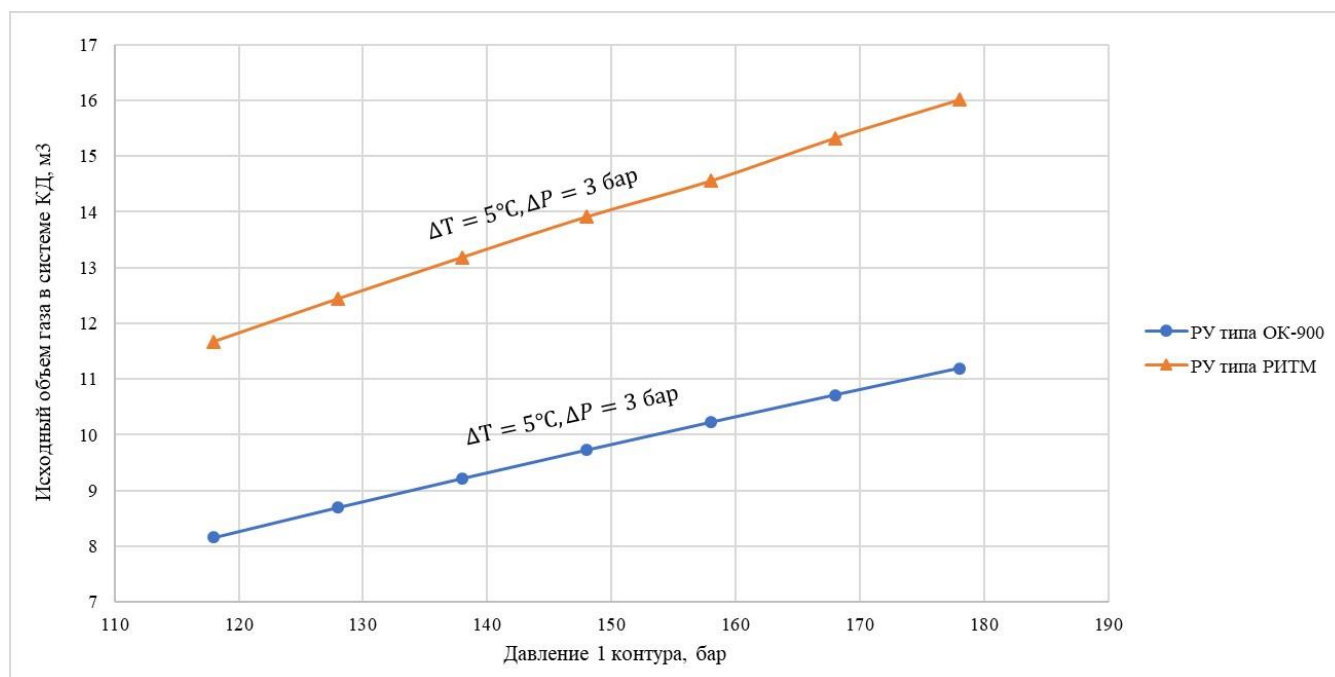


Рис. 7. Зависимость исходного объема газа в системе КД от давления первого контура при одинаковой точности поддержания давления в РУ типа ОК-900 и РИТМ

Fig. 7. Dependence of the initial volume of gas in the pressure compensation system on the pressure of the primary circuit at the same accuracy of pressure maintenance in the ОК-900 and RITM reactor units

На графике видно, что при одной точности поддержания давления объем газа в РУ типа РИТМ при давлении 157 бар должен составлять около 14,5 м³, что существенно больше, чем реальное значение, примененное в проекте. Следовательно, с одной стороны, данный подход позволит установкам нового поколения работать с меньшими изменениями давления в переходных режимах, с другой стороны – потребует увеличения объема СКД.

Режим разогрева РУ типа ОК-900 и РИТМ после расхолаживания и снятия давления в первом контуре до атмосферного

В процессе разогрева и некоторого времени после разогрева происходит растворение газа в воде КД и насыщение воды реактора газом за счет массообмена между реактором и компенсатором, в результате которого концентрации растворенного газа в компенсаторе и реакторе выравниваются. Принципы расчета массопереноса газа из газового объема в воду КД и из КД в реактор приведены в работе [5]. Исходное состояние: реактор заполнен водой массой G_p^0 , в компенсаторе первоначальная заливка - $G_{п.з}$, исходное давление в первом контуре - $P_{1к}^0$, рабочее давление в первом контуре - $P_{1к}$.

Общая масса воды в реакторе и КД перед разогревом:

$$G_{1к} = G_p^0 + G_{п.з} \tag{10}$$

Объем газа, растворившегося при разогреве и работе РУ:

$$V_r = C_{кд} \cdot G_{1к} \tag{11}$$

где $C_{кд} = K(T_{кд}) \cdot P_{1к}^0$ – равновесная концентрация растворенного газа в массе воды первого контура;

Объем газа, растворившегося при разогреве РУ типа РИТМ, составил ~ 430 л, при разогреве РУ типа ОК-900 – 220 л.

Давление в первом контуре после установления равновесной концентрации растворенного газа в теплоносителе первого контура можно определить следующим образом:

$$P_{1к}' = \frac{P_{1к}^0 \cdot (V_{\text{газа в КД}} - V_{\Gamma})}{V_{\text{газа в КД}}} \quad (12)$$

Величина снижения давления в первом контуре с учетом объема газа, растворившегося при разогреве и работе РУ:

$$\Delta P_{1к} = P_{1к}^0 - P_{1к}' \quad (13)$$

Таким образом, давление в первом контуре после установления равновесной концентрации растворенного газа в теплоносителе первого контура РУ типа РИТМ составит 150 бар, снижение по давлению – 10 бар. В РУ типа ОК-900 давление понизится до 126 бар, снижение по давлению – 3,25 бар, что менее сильно отразится на работе РУ.

Режим разогрева РУ типа ОК-900 и РИТМ после расхолаживания без снятия давления

Режим разогрева производится из состояния РУ после расхолаживания без снятия давления. В данном варианте исходным давлением является давление, устанавливающееся после расхолаживания $P_{1к}^{\text{хол}}$.

Объем газа, который находился в растворе до начала разогрева: $V_{\Gamma}' = C_{\text{КД}}' \cdot G_{1к}$, где $C_{\text{КД}}' = K(T_{\text{КД}}) \cdot P_{1к}^{\text{хол}}$ – концентрация растворенного газа в массе воды первого контура перед разогревом.

Объем газа, растворенного в процессе разогрева:

$$V_{\Gamma}'' = V_{\Gamma} - V_{\Gamma}' \quad (14)$$

Объем газа в растворе после разогрева V_{Γ} определяется по соотношению (11).

Давление в первом контуре после растворения газа:

$$P_{1к}'' = \frac{P_{1к}^0 \cdot (V_{\text{газа в КД}} - V_{\Gamma}'')}{V_{\text{газа в КД}}} \quad (15)$$

Величина снижения давления первого контура:

$$\Delta P_{1к} = P_{1к}^0 - P_{1к}'' \quad (16)$$

Таким образом, при режиме разогрева РУ типа РИТМ после расхолаживания без снятия давления, давление понизилось на 5 бар, для РУ типа ОК-900 ~ 1,6 бар.

Заключение

Несмотря на преимущества современных реакторных установок типа РИТМ-200, они имеют недостатки с точки зрения процесса выделения газа в режимах разогрева и расхолаживания и влияния выделившегося газа на повышение давления в первом контуре. Сравнение РУ новых и действующих ледоколов показало, что характеристики, заложенные в установках типа ОК-900А, имели улучшенные показатели работы, существенных проблем во время эксплуатации не возникало. Следовательно, пониженное давление первого контура, увеличение объема газовой подушки относительно объема первого контура, меньший объем первоначальной заливки в КД более благоприятно влияют на процессы газопереноса и газовыделения, и, соответственно, на надежность работы оборудования первого контура.

Исследование процессов растворения, выделения и переноса газов в теплоносителе первого контура показало их влияние не только на водно-газовый и химический режим теплоносителя, но и на изменение давления в контуре, поэтому, проектируя РУ с ВВР и газовой системой компенсации давления, это влияние необходимо учитывать.

Библиографический список

1. **Деев, В.И.** Основы расчета судовых ЯЭУ: учебное пособие / В.И. Деев, Н.В. Щукин, А.Л. Черезов. Под общей редакцией проф. В.И. Деева. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 256 с.
2. **Зверев, Д.Л.** Реакторная установка нового поколения РИТМ-200 для перспективного атомного ледокола / Д.Л. Зверев, А.Н. Пахомов, В.И. Полуничев, К.Б. Вешняков, С.В. Кабин // Атомная энергия. 2012. Т.113. Вып. 6. С. 323-328.
3. **Герасимов, В.В.** Водный режим атомных станций / В.В. Герасимов, А.И. Касперович, О.И. Мартынова. – М.: Атомиздат, 1976. – 398 с.
4. **Полуничев, В.И.** Исследование процессов образования и переноса водорода в первом контуре водо-водяных реакторов с газовой системой компенсации давления и его химического взаимодействия с конструкционными материалами / В.И. Полуничев, Д.И. Новиков, М.А. Дюжий // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 4 (139). С. 66-76. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_66
5. **Филимонов, А.Ф.** Газовыделение и газоперенос в оборудовании первого контура реакторной установки с газовой системой компенсации / А.Ф. Филимонов, В.И. Полуничев, А.Е. Помысухина // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 3 (126). С. 101-110.
6. **Тряков, Д.И.** Газовая система компенсации судовых реакторных установок и ее влияние на надежность работы оборудования первого контура / Д.И. Тряков, В.И. Полуничев // Научно-технический вестник Поволжья. 2022. № 7. С. 50-52.

*Дата поступления
в редакцию: 06.02.2023*

*Дата принятия
к публикации: 25.07.2023*