

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 620.9+519.2

EDN: MLYKHH

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СИСТЕМ КОМПЕНСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ В ПЕРВОМ КОНТУРЕ СУДОВЫХ 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***В.М. Сосин**ORCID: 0009-0004-5821-6290 e-mail: vmsosin@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.Ю. Савельев**ORCID: 0009-0009-2010-699X e-mail: alesha.savelev.com@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Представлен анализ систем компенсации давления (СКД) в первом контуре реакторных установок с ВВР, используемых на отечественных и зарубежных судах. Проведено сравнение систем с точки зрения габаритов, точности поддержания давления, переноса и распределения радиолитических газов, влияния на водно-газовый и химический режим теплоносителя. Разработана методика оценки распределения радиолитических газов в воде первого контура и оборотов СКД, приведены варианты дегазации теплоносителя для обеспечения безопасной эксплуатации установок. Представлена иллюстрация происходящих процессов, определены приоритеты систем по рассмотренным параметрам, которые могут способствовать обоснованному выбору оптимальных вариантов систем компенсации перспективных реакторных установок для судов и атомных станций малой мощности.

Ключевые слова: атомные суда, судовые реакторные установки, газовая и паровая системы компенсации давления, радиолиз воды, радиолитические газы, водно-химический режим.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Полуничев, В.И. Аналитический обзор систем компенсации давления в первом контуре судовых реакторных установок / В.И. Полуничев, В.М. Сосин, А.Ю. Савельев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 3. С. 36-47. EDN: MLYKHH

REVIEW OF PRESSURE COMPENSATION SYSTEMS IN PRIMARY CIRCUIT OF NUCLEAR MARINE REACTORS

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***V.M. Sosin**ORCID: 0009-0004-5821-6290 e-mail: vmsosin@yandex.ruNizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.Yu. Savelyev

ORCID: 0009-0009-2010-699X e-mail: alesha.savelev.com@mail.ru

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. This paper presents an analysis of pressure compensation systems in the primary circuit of water-water energetic reactors (WVER) used on domestic and foreign ships. The systems are compared in terms of dimensions, pressure maintenance accuracy, transfer and distribution of radiolytic gases, influence on water-gas and chemical regime of coolant. The methodology of estimation of radiolytic gases distribution in the primary circuit water and equipment of the pressure compensation system is developed, variants of coolant degassing to ensure safe operation of the reactors are given. An illustration of the processes taking place is made, some priorities of the systems according to the considered parameters are determined, which can contribute to a reasonable choice of optimal variants when designing prospective reactors for ships and small sized nuclear power plants.

Key words: nuclear-powered ship, ship reactor plants, gas and steam compensation systems, water radiolysis, radiolytic gases, water chemistry regime.

FOR CITATION: V.I. Polunichev, V.M. Sosin, , A.Yu. Savelyev. Review of pressure compensation systems in primary circuit of nuclear marine reactors. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 3. Pp. 36-47. EDN: MLYKHH

Введение

Одной из систем, влияющих на надежность работы реакторной установки, является система компенсации давления (СКД) первого контура. Она предназначена для приема и возврата воды первого контура при температурных изменениях ее объема, создания и поддержания давления в контуре в необходимых пределах во всех режимах работы установки. Кроме того, система влияет на габариты установки, водно-газовый и химический режим теплоносителя, перенос газов и их распределение, в том числе, радиолитических, которые, в свою очередь, влияют на ресурс и надежность работы оборудования и установки в целом.

Реальное применение в мировой атомной энергетике нашли два типа систем компенсации – паровая и газовая. В отечественной судовой энергетике паровая система компенсации (ПСКД) использовалась в единственной РУ (ОК-150) атомного ледокола «Ленин». В дальнейшем на отечественных атомных судах и АСММ применялась газовая система компенсации давления (ГСКД). На зарубежных атомных судах «Саванна» (США), «Отто Ган» (ФРГ) и «Муцу» (Япония) использовались ВВР с паровыми системами компенсации давления, которые имели свои особенности, некоторые из них будут рассмотрены в данной работе.

Результаты выполненного анализа интересны для проектантов с точки зрения конструктивных особенностей систем компенсации, опыта их эксплуатации и влияния на надежность работы реакторных установок.

Система компенсации давления реакторной установки ОК-150 атомного ледокола «Ленин»

Первая реакторная установка ОК-150 ледокола «Ленин» имела паровую систему компенсации давления (рис. 1). В состав системы входили три «горячих» (ГКД) и один «холодный» компенсатор давления (ХКД). Давление в системе создавалось паром, генерируемым в компенсаторах электронагревателями. В ГКД нагреватели работали во всех режимах, в ХКД – только при разогреве установки. По расчету при номинальном давлении 19,6 МПа в ГКД температура воды соответствует температуре насыщения – 362 °С, в ХКД – 345 °С. По опытным данным температура воды в ХКД составляет 278-333 °С. При повышении температуры в первом контуре теплоноситель из «холодной» ветки циркуляции после парогенератора поступает в ГКД, при снижении – из ХКД в реактор. Для реализации такого перемещения теплоносителя в системе установлены обратные клапаны. В нижней части подъемной трубы душиру-

ющего устройства ХКД имелось переливное отверстие для выравнивания в стационарных режимах массовых уровней воды в компенсаторах. Ограничение повышения давления в переходных и аварийных режимах обеспечивалось за счет снижения мощности электронагревателей и впрыска воды с пониженной температурой в паровое пространство ГКД. Снижение давления компенсировалось вскипанием воды в ГКД, находящейся на линии насыщения, и повышением мощности электронагревателей. Разогрев и расхолаживание установки проводилось без дренажа и подпитки первого контура теплоносителем.

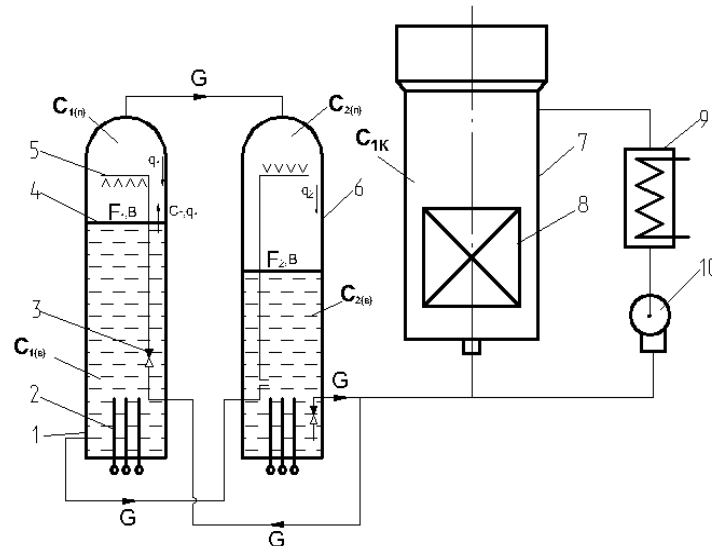


Рис. 1. ПСКД РУ ОК-150 ледокола «Ленин»:

1 – «горячий» компенсатор, 2 – электронагреватель, 3 – обратный клапан, 4 – уровень воды, 5 – душирующее устройство, 6 – «холодный» компенсатор, 7 – реактор, 8 – активная зона, 9 – парогенератор, 10 – главный циркуляционный насос

Fig. 1. Steam pressure compensation system of the OK-150 reactor of the icebreaker Lenin:

1 – «hot» compensator, 2 – electric heater, 3 – check valve, 4 – water level, 5 – sprayer, 6 – «cold» compensator, 7 – reactor, 8 – reactor core, 9 – steam generator, 10 – main circulation pump

В процессе работы подобной установки в реакторе происходит радиолиз воды первого контура с образованием радиолитических газов. Радиолитические газы, включающие водород, растворяются в теплоносителе и за счет массообмена переносятся в оборудование системы компенсации и первого контура и распределяются с определенными концентрациями в водяных и паровых объемах в соответствии с тепло-гидравлическими параметрами. Перенос газа, осуществляется по следующей схеме. Газовый раствор из реактора поступает через душирующее устройство в ГКД, в котором вода нагревается до температуры насыщения и газ выделяется в паровой объем. Образующаяся парогазовая смесь по трубопроводу поступает в ХКД, где пар частично конденсируется, и концентрация газа в паре повышается. Одновременно происходит растворение газа на зеркале воды, в струях и конденсате, стекающем по стенкам корпуса, и перенос его в воду ХКД и далее в реактор. В реакторе часть поступивших радиолитических газов, в том числе, водород, под действием радиационного облучения взаимодействуют, снижая концентрацию. Это создает предпосылки для организации самоподдерживающегося ВХР первого контура. Иллюстрацию происходящих процессов газопереноса и распределения концентраций радиолитических газов в первом контуре и системе компенсации давления РУ ОК-150 выполним на результатах расчета.

Расчет распределения концентраций радиолитических газов в воде первого контура и оборудовании ПСКД РУ ОК-150

Процессы газопереноса при расчете концентрации радиолитических газов в системе компенсации исследуются в соответствии с расчетной схемой (рис. 1). Поток газа через поверхность раздела фаз за счет массообмена может быть найден из уравнения:

$$Q = \beta \cdot F(C_B^H - C^П) \quad (1)$$

где $C^П$ – концентрация газа в паре компенсатора давления; β – коэффициент массообмена на поверхности раздела фаз; F – площадь поверхности раздела фаз; C_B^H – концентрация насыщения газа в жидкости.

Процесс выхода радиолитических газов с потоком пара из воды компенсатора давления (Q_1) и обратный переход воды из паровой фазы (Q_2) определяется следующими формулами:

$$Q_1 = q_1 \cdot C_п^{ГКД} \quad (2)$$

$$Q_2 = q_2 \cdot C^П \quad (3)$$

где q_1 – поток паро-газовой смеси из воды компенсатора давления в паровой объем; q_2 – поток конденсата из парового объема в воду компенсатора давления; $C_п^{ГКД}$ – концентрация газа в паре, уносимом в паровой объем компенсатора давления.

В соответствии с расчетной схемой процесс массопереноса газов и распределения концентраций в оборудовании описывается следующим образом.

Изменения концентраций газа:

– в объеме воды 1-го контура

$$m_{1к} \frac{dc_{1к}}{dt} = Z(t) - C_{1к} \cdot G + C_2^B \cdot G \quad (4)$$

где m – масса; t – время; $Z(t)$ – скорость образования радиолитических газов в активной зоне; F_1 – площадь зеркала воды в ХКД.

• в объеме воды ГКД

$$m_1^B \frac{dc_1^B}{dt} = -\beta \cdot F_1(C_1^B - C_1^П) - q_1 \cdot C_п^{ГКД} + q_1 \cdot C_1^П - C_1^B \cdot G \quad (5)$$

• в паровом объеме ГКД

$$m_1^П \frac{dc_1^П}{dt} = C_{1к} \cdot G - C_1^П \cdot G + \beta \cdot F_1(C_1^B - C_1^П) + q_1 \cdot C_п^{ГКД} - q_1 \cdot C_1^П \quad (6)$$

• в объеме воды ХКД

$$m_2^B \frac{dc_2^B}{dt} = \beta \cdot F_2(C_2^П - C_2^B) + q_2 \cdot C_2^П - C_2^B \cdot G \quad (7)$$

где F_2 – площадь зеркала воды в ХКД.

• в паровом объеме ХКД

$$m_2^П \frac{dc_2^П}{dt} = C_1^B \cdot G + C_1^П \cdot G - \beta \cdot F_2(C_2^П - C_2^B) - q_2 \cdot C_2^П \quad (8)$$

$Z(t)$ – скорость образования радиолитических газов, поступающих в активную зону из ХКД при радиационном облучении (в результате радиолитических процессов образуются короткоживущие неустойчивые радикалы в больших концентрациях, которые впоследствии рекомбинируют в устойчивые молекулы, накапливающиеся в малой концентрации при проходе через активную зону) [4]. Учет скорости образования радиолитических газов в активной зоне задан убывающей функцией от 100 до $0 \frac{нсм^3}{с}$ за 1 час. Данная функция задана исходя из условия, что при увеличении концентрации газов (H_2) радиолитиз снижается до нуля.

Решение системы уравнений (4) – (8) приведено на рис. 2. При этом приняты следующие начальные условия: $C_{1к} = C_1^B = C_1^П = C_2^B = C_2^П = 0 \frac{нсм^3}{кг}$.

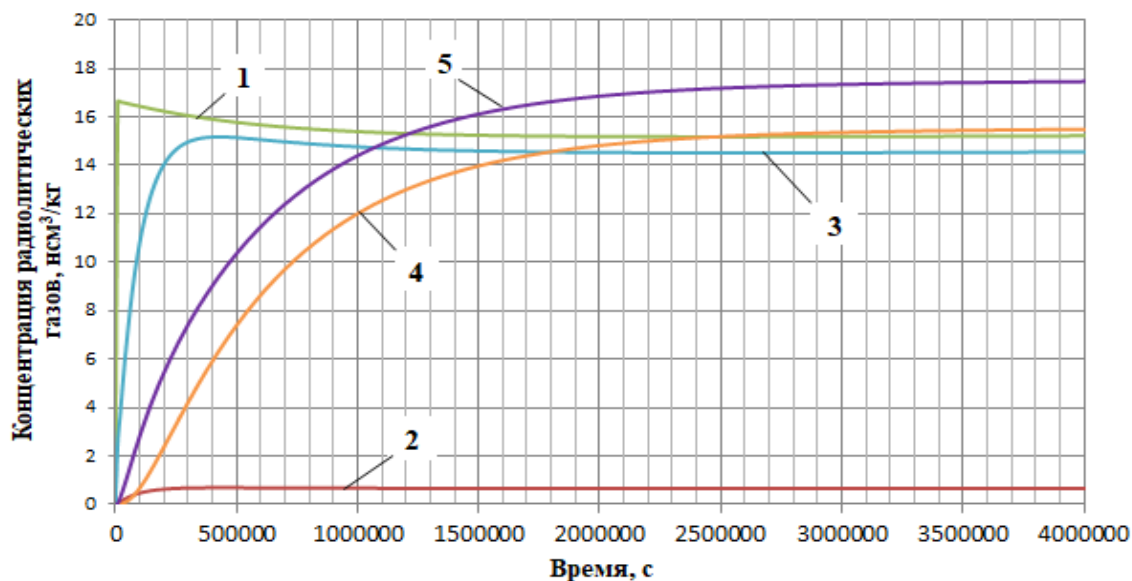


Рис. 2. Распределения концентраций радиолитических газов в воде 1-го контура и оборудовании ПСКД РУ ОК-150: 1 – C_{1K} ; 2 – C_1^B ; 3 – $C_1^П$; 4 – C_2^B ; 5 – $C_2^П$.

Fig. 2. Distributions of radiolytic gas concentrations in the primary circuit water and equipment of the steam pressure compensation system of the ОК-150 reactor: 1 – C_{1K} ; 2 – C_1^B ; 3 – $C_1^П$; 4 – C_2^B ; 5 – $C_2^П$.

Из графика следует, что в процессе работы установки вода и пар в ГКД дегазируются, а в ХКД насыщаются газом до высоких концентраций, и растворенный газ интенсивно переносится в реактор и там рекомбинирует. В процессе работы установки в воде первого устанавливается равновесная концентрация радиолитических газов близкая к концентрации в воде ХКД, в других объемах СКД – в соответствии с графиком на рис. 2. При избыточном содержании в теплоносителе водорода наиболее эффективную дегазацию производить путем отбора парогазовой смеси из ХКД во внешнюю систему утилизации радиолитических газов.

Достоинствами системы являются обеспечение высокой точности поддержания давления в первом контуре. В стационарных режимах отклонение давления от номинального составляло $19,6 \pm 0,49$ МПа (в ВВЭР-1000 – не более $15,7 \pm 0,29$ МПа), гарантированное отсутствие вскипания воды в трубопроводе отвода теплоносителя из ХКД в реактор, малый объем системы компенсации по сравнению с другими вариантами вынесенных систем из-за пониженной температуры воды в ХКД.

Система компенсации давления судна «Отто Ган»

В РУ атомного судна «Отто Ган» использовался парогенерирующий блок (ПГБ) интегрального типа со встроенными в корпус парогенераторами и паровым компенсатором давления (рис. 3). Давление в парогенерирующем блоке поддерживается за счет пара над уровнем теплоносителя, генерируемого за счет испарения с поверхности раздела фаз и частичного кипения теплоносителя в активной зоне. Электронагреватели в данной ПСКД не используются. При номинальной мощности объемное паросодержание в теплоносителе составляет около 6 %. Радиолитический газ в реакторах с присутствием объемного кипения протекает интенсивнее по сравнению с ВВЭР. Газ, растворенный в теплоносителе, выделяется и переносится с паром в паровую полость реактора. Пар в компенсаторе конденсируется на стенках корпуса, конденсат с растворенным газом стекает в теплоноситель. Концентрация газа в паре при этом повышается. Для исключения избыточной концентрации радиолитических газов в данной установке используется система дегазации теплоносителя, обеспечивающая отвод парогазовой смеси из парового объема компенсатора с последующим снижением давления, охлаждением и сбросом газа в газосборники и возвращением конденсата в контур подпиточными насосами [8].

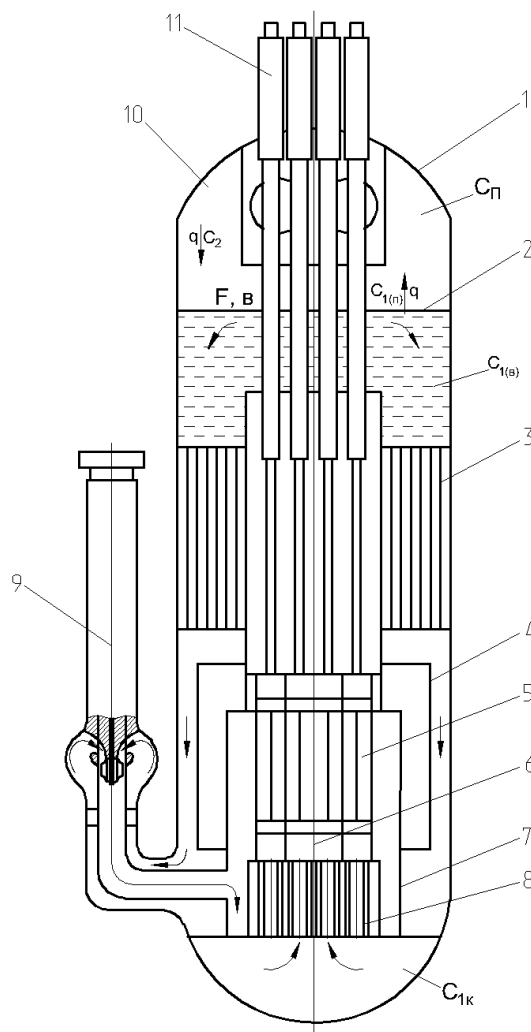


Рис. 3. Схема реактора судна «Отто Ган» со встроенной ПСКД:

1 – крышка реактора, 2 – уровень воды, 3 – парогенератор, 4 – тепловой экран, 5 – активная зона (АЗ), 6 – корзина АЗ, 7 – разделительная обечайка, 8 – фильтр, 9 – насос, 10 – парогазовый объем КД, 11 – приводы регулирующих стержней

Fig. 3. Scheme of the ship Otto Hahn reactor with integrated steam pressure compensation system:

1 – reactor head, 2 – water level, 3 – steam generator, 4 – heat shield, 5 – reactor core, 6 – core support barrel, 7 – separating shell, 8 – filter, 9 – pump, 10 – steam-gas volume of the pressure compensator, 11 – control rod drives

Расчет распределения концентраций радиолитических газов в воде 1-го контура и паровом объеме РУ судна «Отто Ган»

Оценочный расчет изменения концентраций радиолитических газов на участках 1-го контура выполнен следующим образом.

Изменение концентрации газа:

- для воды 1-го контура

$$m_{1k} \frac{dC_{1k}}{dt} = Z(t) - \beta \cdot F(C^B - C^П) - q \cdot C_{п}^{1k} + q \cdot C^П \quad (9)$$

- для пара в объеме встроенного КД

$$m_{п} \frac{dC_{п}}{dt} = \beta \cdot F(C^B - C^П) + q \cdot C_{п}^{1k} - q \cdot C^П \quad (10)$$

Решение системы уравнений (9) – (10) приведено на рис. 4. При этом принимаются следующие начальные условия: $C_{1К} = C_{П} = 0 \frac{\text{нсм}^3}{\text{кг}}$.

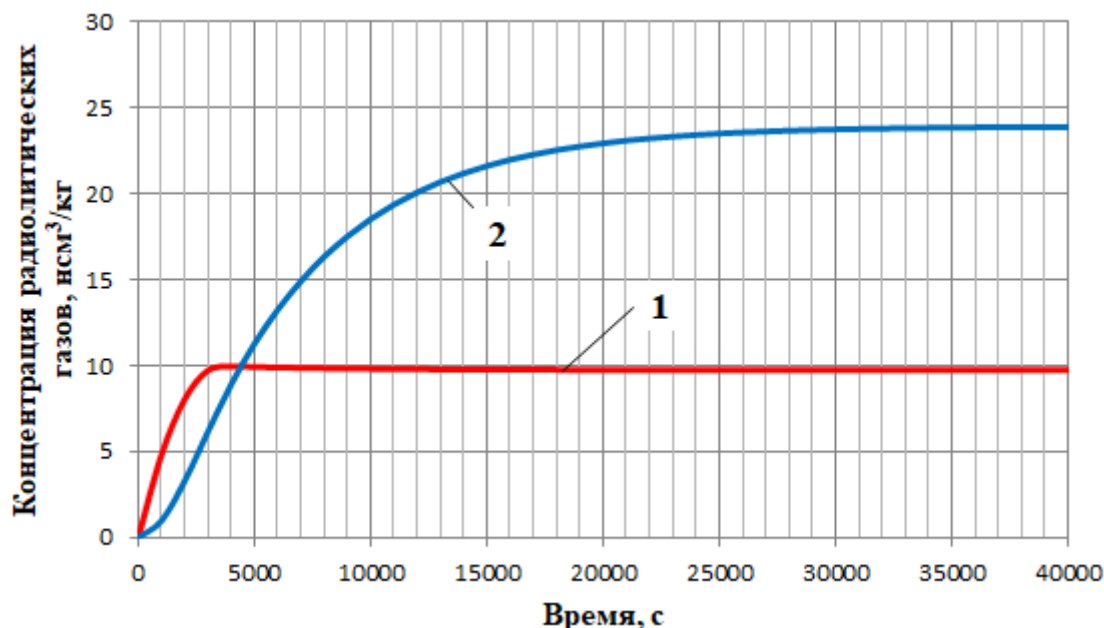


Рис. 4. Распределения концентраций радиолитических газов в воде 1-го контура и оборудовании РУ судна «Отто Ган»: 1 – $C_{1К}$; 2 – $C_{П}$.

Fig. 4. Distributions of radiolytic gas concentrations in the primary circuit water and reactor equipment of the ship Otto Hahn: 1 – $C_{1К}$; 2 – $C_{П}$.

Из графика следует, что в процессе работы устанавливаются равновесные концентрации в паровом объеме компенсатора и воде первого контура, при этом концентрация газа в паре значительно выше, чем в воде. При избыточном содержании в теплоносителе водорода наиболее эффективно дегазацию производить путем отбора парогазовой смеси во внешнюю систему утилизации газа.

Достоинствами встроенной системы компенсации РУ «Отто Ган» являются отсутствие электронагревателей, компактное размещение компенсатора в ПГБ. С точки зрения компоновки парогенерирующего блока установка являлась наиболее прогрессивной во время ее создания и остается до настоящего времени. Существенными недостатками являются объемное кипение теплоносителя в активной зоне и связанный с этим повышенный радиолиз воды в активной зоне, необходимость системы поддержания водно-газового и химического режима, зависимость давления в контуре от выходной температуры из активной зоны.

Система компенсации давления судов «Саванна» и «Муцу»

В РУ судов «Саванна» и «Муцу» для поддержания давления в первом контуре применена вынесенная ПСКД, представленная на рис. 5,6. ПСКД имеет конструкцию, аналогичную системе ВВЭР-1000. Поддержание давления в первом контуре осуществляется за счет работы электронагревателей КД и впрыска «холодного» теплоносителя в компенсатор.

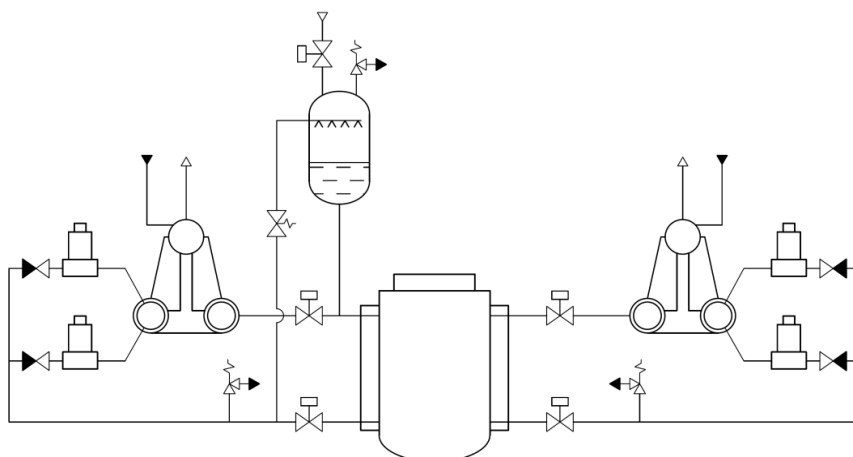


Рис. 5. Принципиальная схема 1-го контура РУ судна «Саванна»

Fig. 5. Schematic diagram of the primary circuit of the ship Savannah reactor

Главным отличием от системы компенсации ОК-150 является отсутствие ХКД. Локализация газообразных продуктов, выделяющихся из воды компенсатора, происходит в паровой полости ПКД за счет конденсации пара на стенках корпуса и струях впрыскиваемой воды. При достижении критической концентрации газа (водорода) в паре, которую можно определить по снижению температуры парогазовой среды в ПКД, необходимо предпринимать меры по ее снижению. На установках «Саванна» [6], и «Муцу» [7] используется система непрерывной газоочистки. При повышенном удельном газосодержании в первом контуре теплоноситель прокачивается через теплообменник, затем через дроссельное устройство подается в расширительную емкость. При снижении давления из теплоносителя выделяется растворенный газ, который компрессором нагнетается в газосборник. Дегазированный теплоноситель из расширительной емкости подается в первый контур подпиточным насосом.

Для иллюстрации процесса газопереноса выполнен оценочный расчет на основе схемы (рис. 6).

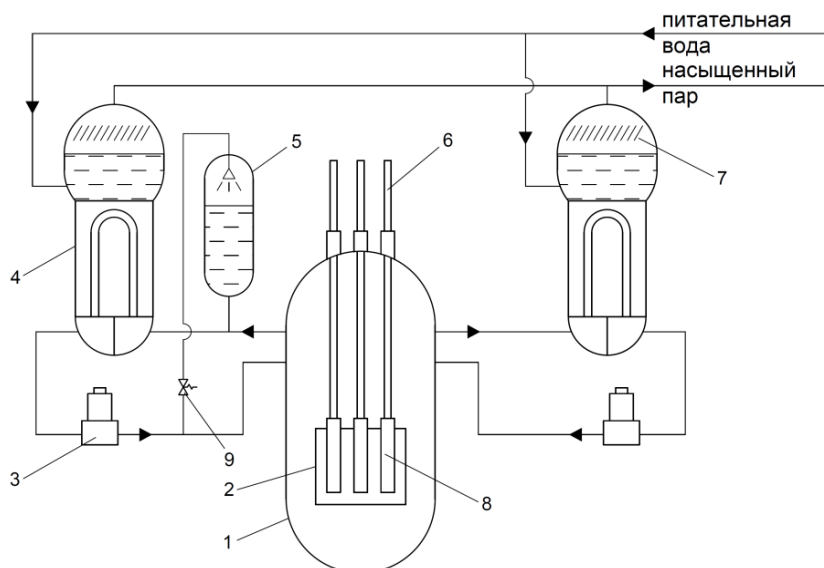


Рис. 6. Принципиальная схема РУ судна «Муцу»:

1 – реактор, 2 – активная зона, 3 – насос, 4 – парогенератор, 5 – компенсатор давления, 6 – СУЗ, 7 – сепаратор, 8 – стержни регулирования

Fig. 6. Schematic diagram of the ship Mutsu reactor:

1 – reactor, 2 – reactor core, 3 – pump, 4 – steam generator, 5 – pressure compensator, 6 – control and protection system, 7 – separator, 8 – control rods

Расчет распределения концентраций радиолитических газов в воде 1-го контура и паровом объеме РУ судна «Саванна» и «Муцу»

В соответствии с расчетной схемой процессы массопереноса газов и распределения концентраций в оборудовании описываются следующими уравнениями.

Концентрации газа:

- для воды 1-го контура

$$m_{1к} \frac{dc_{1к}}{dt} = Z(t) - C_{1к} \cdot G + C^B \cdot G \quad (11)$$

- для воды в КД

$$m_B \frac{dC^B}{dt} = C_{1к} \cdot G - C^B \cdot G - \beta \cdot F(C^B - C^П) - q \cdot C_n^{1к} + q \cdot C^П \quad (12)$$

- для пара в объеме КД

$$m_n \frac{dC^П}{dt} = \beta \cdot F(C^B - C^П) + q \cdot C_n^{1к} - q \cdot C^П \quad (13)$$

Решение системы уравнений (11) – (13) приведено на рис. 7. При этом принимаются следующие исходные данные: $C_{1к} = C^П = C^B = 0 \frac{нсм^3}{кг}$.

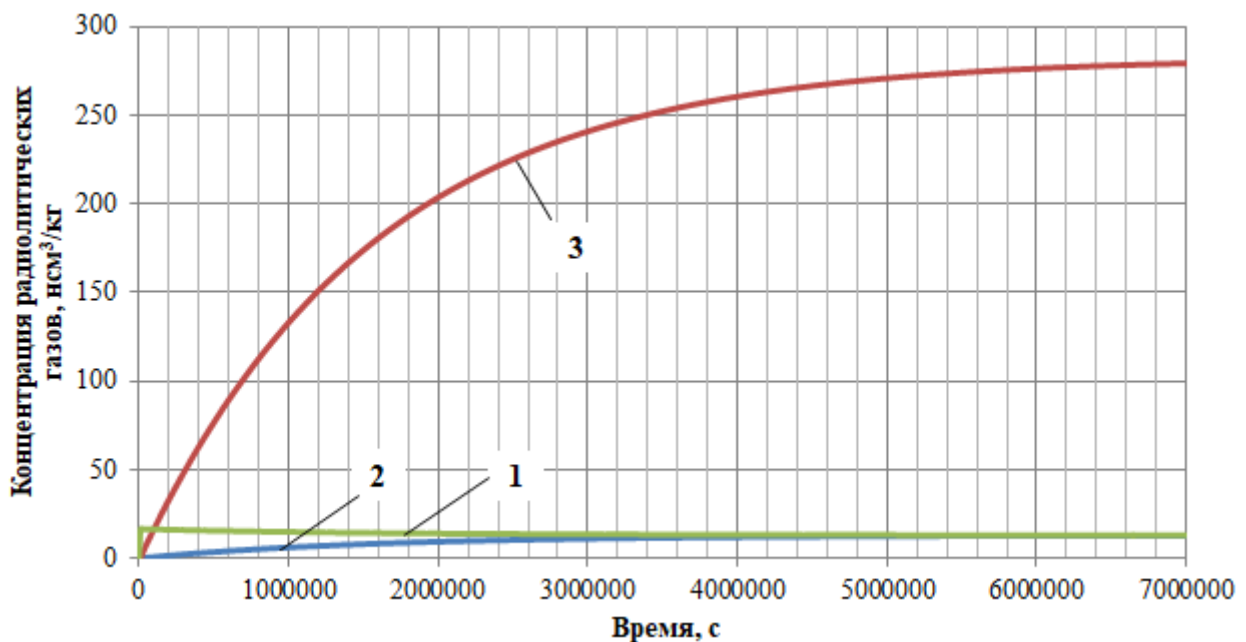


Рис. 7. Распределения концентраций радиолитических газов в воде 1-го контура и оборудовании РУ судна «Саванна» и «Муцу»:

1 - $C_{1к}$; 2 - C^B ; 3 - $C^П$

Fig. 7. Distributions of radiolytic gas concentrations in the primary circuit water and reactor equipment of the ships Savannah and Mutsu: 1 - $C_{1к}$; 2 - C^B ; 3 - $C^П$

Из графика видно, что вода, находящаяся на линии насыщения, дегазируется в КД, а пар насыщается радиолитическими газами до высоких концентраций. При работе установки происходит конденсация пара из парогазовой смеси на стенках компенсатора и перенос конденсата в воду компенсатора, тем самым снижается концентрация в паровом объеме. В результате устанавливаются равновесные концентрации в оборудовании системы компенсации и в 1-ом контуре.

Главным недостатком данной ПСКД является проблема отвода из парового пространства радиолитических неконденсирующихся газов, поступающих в него в результате дегазации теплоносителя первого контура.

Газовая система компенсации давления отечественных судовых реакторных установок типа ОК-900

При модернизации ледокола «Ленин» реакторные установки ОК-150 с паровой системой компенсации были демонтированы, на их место установлены РУ ОК-900 блочной компоновки с газовой системой компенсации (рис. 8). Основными элементами системы являются компенсаторы, газовые баллоны и соединяющие их трубопроводы. Рабочим телом в системе является азот. Водяная полость компенсатора соединена с реактором, газовая – с газовыми баллонами, в которых находится основная часть газа. В некоторых вариантах весь газ сосредоточен в компенсаторах давления.

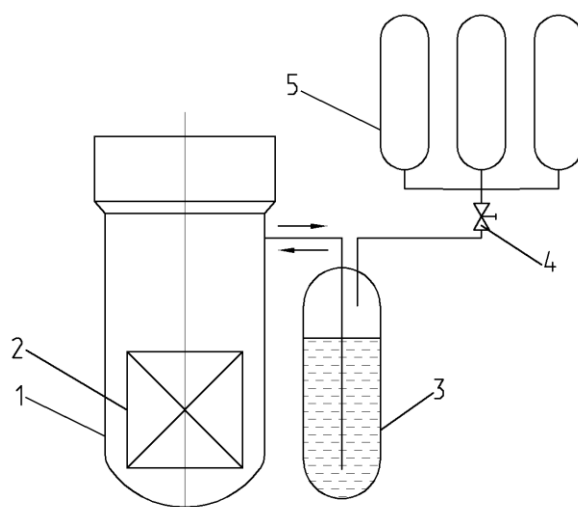


Рис. 8. Схема газовой системы компенсации РУ типа ОК-900:

1 – реактор, 2 – активная зона, 3 – компенсатор давления, 4 – запорная арматура, 5 – газовые баллоны

Fig. 8. Scheme of gas compensation system of the ОК-900 reactor:

1 – reactor, 2 – reactor core, 3 – pressure compensator, 4 – isolation valve, 5 – gas cylinders

При работе установки азот растворяется в воде компенсатора и за счет массообмена переносится в 1-ый контур, достигая равновесной концентрации.

Изменение концентрации азота в воде КД с течением времени описывается формулой [5]:

$$V_{\text{КД}} \cdot \frac{dC_{\text{КД}}}{dt} = \alpha \cdot S \cdot (C_{\text{КД}}^{\text{н}} - C_{\text{КД}}) \quad (14)$$

где $V_{\text{КД}}$ – объем воды в КД; $C_{\text{КД}}$ – концентрация газа в воде КД; S – площадь поверхности раздела фаз; α – коэффициент массообмена между водной и газовой фазой; $C_{\text{КД}}^{\text{н}}$ – концентрация насыщения в воде компенсатора.

Изменение концентрации азота в воде 1-го контура:

$$G_{1\text{К}} \cdot \frac{dC_{1\text{К}}}{d\tau} = \beta \cdot (C_{\text{КД}}^{\text{н}} - C_{1\text{К}}) \quad (15)$$

где: $G_{1\text{К}}$ – масса воды в первом контуре; $C_{1\text{К}}$ – концентрация газа в воде первого контура; β – коэффициент массообмена между 1-ым контуром и КД.

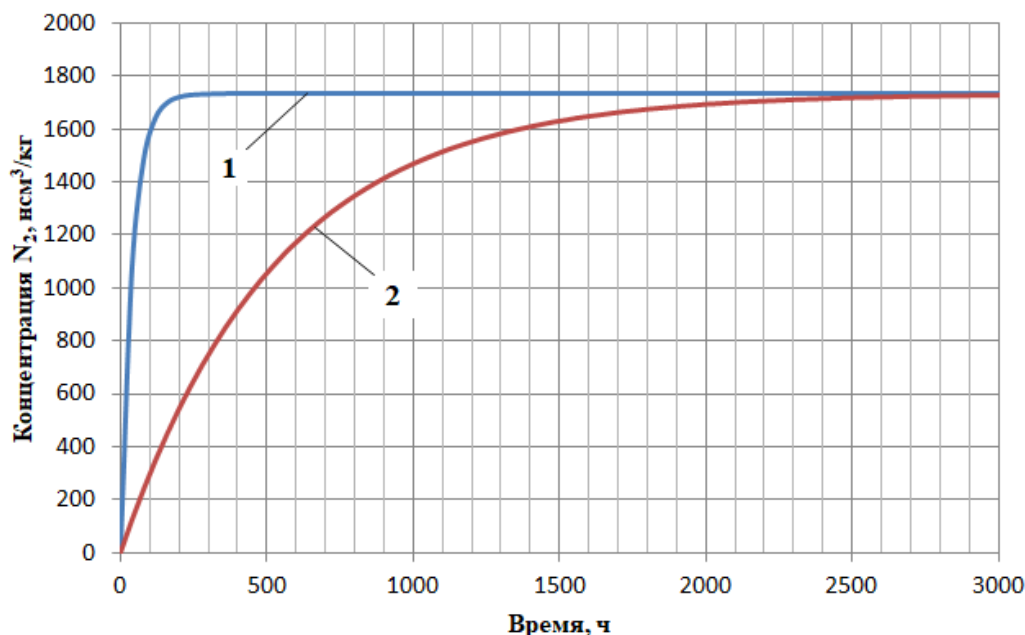


Рис. 9. Изменение концентрации газа в ГСКД и теплоносителе 1-го контура:
1 – $C_{КД}$, 2 – $C_{1К}$

Fig. 9. Change in gas concentration in the gas pressure compensation system and the primary circuit coolant: 1 – $C_{КД}$, 2 – $C_{1К}$

На рис. 9 показан характер повышения концентрации растворенного азота в воде КД и теплоносителе 1-го контура в начале работы РУ. Для решения уравнений 14, 15 принимались следующие исходные данные: $C_{КД}^H = 1734 \frac{\text{нсм}^3}{\text{кг}}$, $V_{КД} = 2\text{м}^3$, $S = 1\text{м}^2$, $\alpha = 0,05 \frac{\text{м}}{\text{ч}}$, $\beta = 0,01 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$, $G_{1К} = 19160\text{кг}$. Из графика видно, что насыщение воды КД азотом ($C_{КД} = C_{КД}^H$) происходит достаточно быстро (примерно 120 час с момента подачи газа в КД) по сравнению с теплоносителем первого контура.

При аммиачном ВХР в теплоноситель первого контура вводится аммиак для поддержания необходимой концентрации водорода. Присутствие водорода обеспечивает подавление радиолиза и поддерживает концентрацию кислорода в теплоносителе не более 10 мкг/кг. Источниками водорода являются радиолиз воды, радиолитическое разложения аммиака при аммиачном водно-химическом режиме, коррозионные процессы конструкционных материалов [5]. Водород растворяется в теплоносителе до равновесной концентрации. В компенсаторе давления он выделяется из воды в газовый объем компенсатора и перемешивается с азотом в компенсаторе и газовых баллонах. Для предотвращения превышения нормативных значений концентрации водорода предусматриваются варианты дегазации теплоносителя: поэтапное снижение давления в первом контуре до атмосферного и удаление газа из оборудования, поглощение водорода специальным сорбентом в ионообменном фильтре, замена газа в системе компенсации и др.

Принципиальным отличием газовой системы компенсации от паровой системы является высокая концентрация растворенных газов в теплоносителе первого контура и воде системы компенсации. Процессы растворения, выделения и переноса газа, влияние его на работу активной зоны и оборудования первого контура, водно-газовый и химический режим рассмотрены в работах [9-11] и в данной статье не приводятся.

Заключение

Результаты выполненного анализа СКД реакторных установок с ВВР и разработанная методика оценки переноса и распределения радиолитических газов в воде 1-го контура и оборудовании СКД могут быть полезны при разработке реакторных установок для судов и атомных станций малой мощности.

Библиографический список

1. **Козн, П.** Технология воды энергетических реакторов. – М., Атомиздат. 1973. – 327 с.
2. **Герасимов, В.В.** Водный режим атомных электростанций / В.В. Герасимов, А.И. Касперович, О.И. Мартынова. – М.: Атомиздат. 1976. – 398 с.
3. **Полуничев, В.И.** Анализ и оптимизация систем компенсации давления первого контура в реакторных установках с ВВР / В.И. Полуничев, С.А. Горбатов, Ю.А. Тимофеев // Научно-технический вестник Поволжья. 2020. № 6. С. 36-39.
4. **Бекман, И.Н.** Атомная и ядерная физика: радиоактивность и ионизирующие излучения: учебник для среднего профессионального образования / И.Н. Бекман. – М.: Юрайт, 2020. – 493 с.
5. **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. С. 67-76.
6. **Поздеев А.В.** Судовые атомные энергетические установки / А.В. Поздеев. – Л.: Судостроение, 1964. – 820 с.
7. Nuclear Engineering and Design. V.10. 1969.
8. **Kostrzewa, S.** Die Reaktorlage des Kernenergie-Forschungsschiffes NS “Otto Hahn” / S. Kostrzewa // Electrotechnische Zeitschrift, Helf. 20. 1969.
9. **Полуничев, В.И.** Возможные пути повышения ресурса активных зон с циркониевыми элементами ТВС для перспективных судов и АСММ / В.И. Полуничев, А.Ф. Филимонов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 4. С. 104-112.
10. **Полуничев, В.И.** Исследование процессов растворения, выделения и переноса газов в первом контуре реакторных установок и их влияния на точность поддержания давления в первом контуре / В.И. Полуничев, М.С. Кабина // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 3 (142). С. 71- 81.
11. **Филимонов, А.Ф.** Газовыделение и газоперенос в оборудовании первого контура Реакторных установок с газовой системой компенсации давления / А.Ф. Филимонов, В.И. Полуничев, А.Е. Помысухина // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 3 (106). С. 101-110.

*Дата поступления
в редакцию: 03.04.2024*

*Дата принятия
к публикации: 10.07.2024*