

УДК 621.039

EDN: HOZUUR

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ГАЗОВОЙ СИСТЕМЕ КОМПЕНСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК ТИПА «РИТМ» В РЕЖИМЕ РАЗОГРЕВА

В.И. ПолуничевORCID: 0000-0003-1859-9616 e-mail: dep59@okbm.nnov.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***А.Н. Соколов**ORCID: 0009-0003-5313-9620 e-mail: asokmail@mail.ruАО «ОКБМ Африкантов», *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

Представлены результаты исследования возможных причин превышения проектных значений давления в первом контуре реакторных установок типа «РИТМ» с газовой системой компенсации давления в режимах разогрева, стационарной работы после разогрева и в переходных процессах. Проведен анализ тепло-гидравлических процессов, происходящих в оборудовании газовой системы компенсации давления в данных режимах, приводящих к изменению температуры воды и газа. Разработана методика расчета и представлены расчетные оценки процессов теплообмена в системе компенсации и первом контуре. Определено изменение температуры воды и газа в оборудовании системы и, в соответствии с этим, изменение давления в первом контуре. Исследованы процессы растворения, выделения и переноса газов в системе компенсации и первом контуре перед разогревом, в процессе и после разогрева. Разработана методика оценки влияния указанных процессов на давление в контуре, приведены результаты расчета. Предложены возможные варианты модернизации системы и изменения режимов работы установки.

Ключевые слова: универсальный атомный ледокол, реактор интегрального типа модульный (РИТМ), газовая система компенсации давления, теплообмен, растворение и выделение газа в теплоносителе, режим разогрева.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Полуничев, В.И. Анализ процессов теплообмена в газовой системе компенсации давления реакторных установок типа «РИТМ» в режиме разогрева / В.И. Полуничев, А.Ю. Савельев, А.Н. Соколов, В.М. Сосин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 2. С. 69-77. EDN: HOZUUR

ANALYSIS OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES IN GAS PRESSURE COMPENSATION SYSTEM OF RITM TYPE REACTOR INSTALLATIONS IN HEATING MODE

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

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

A.N. Sokolov

ORCID: **0009-0003-5313-9620** e-mail: **asokmail@mail.ru**

«Afrikantov» Joint Stock Company
Nizhny Novgorod, Russia

V.M. Sosin

ORCID: **0009-0004-5821-6290** e-mail: **vmsosin@yandex.ru**

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

Abstract. This paper presents the results of a study of possible reasons for pressure increase above design values in the primary circuit of RITM type reactor installations with a gas pressure compensation system in heating modes, stationary operation after heating and in transients. An analysis of thermal-hydraulic processes occurring in the equipment of the gas pressure compensation system in these modes, leading to changes in the temperature of water and gas, was carried out. A calculation method has been developed and estimates of heat and mass transfer processes in the compensation system and the primary circuit were carried out. The change in temperature of water and gas in the system equipment and the change in pressure in the primary circuit were determined. The processes of dissolution, release and transfer of gases in the compensation system and the primary circuit before heating, during and after heating were studied. A methodology for assessing the influence of these processes on the pressure in the circuit has been developed, and the calculation results are presented. Possible options for upgrading the system and changing the operating modes of the installation are proposed.

Key words: universal nuclear icebreaker, reactor integral type modular (RITM), gas pressure compensation system, heat and mass transfer, dissolution and release of gas in the coolant, heating mode.

FOR CITATION: V.I. Polunichev, A.Yu. Savelyev, A.N. Sokolov, V.M. Sosin. Analysis of heat and mass transfer processes in gas pressure compensation system of RITM type reactor installations in heating mode. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 2. Pp. 69-77. EDN: HOZUUR

Введение

Исследованиям процессов растворения, выделения и переноса газов в первом контуре и их влиянию на характеристики реакторных установок (РУ) посвящено ограниченное количество работ. Наиболее системно они исследованы еще в начале развития атомной энергетики [1, 2]. В работе [2] в общем плане эти процессы рассмотрены для РУ с газовой системой компенсации. Вместе с тем, к настоящему времени накоплен обширный опыт эксплуатации таких установок на отечественных атомных судах, при этом выявлены некоторые проблемы в работе систем компенсации и их негативное влияние на работу РУ в различных режимах, которые полностью не решены до настоящего времени.

Современные установки типа «РИТМ» для новых ледоколов и станций малой мощности имеют газовую систему компенсации давления (СКД), отличающуюся от предыдущих поколений. В систему, кроме компенсаторов, введены гидроаккумуляторы (ГА), на некоторых новых установках газ системы компенсации полностью сосредоточен в КД и ГА, в то время как в системе компенсации установок предыдущих поколений типа ОК-900 основная часть газа находится в баллонах, расположенных в аппаратном помещении, в котором температура поддерживается системой кондиционирования в узком диапазоне. Кроме того, увеличен объем первоначального заполнения теплоносителем оборудования системы компенсации, в КД установлены буферные емкости (БЕ). В ходе испытаний установки РИТМ-200 головного

универсального атомного ледокола в режиме разогрева при достижении температуры теплоносителя первого контура близкой к номинальной, имело место нехарактерное для РУ типа ОК-900 превышение давлением проектных значений (рис. 1). При дальнейшей работе установки после разогрева давление некоторое время медленно снижалось на значительную величину, затем стабилизировалось. Подобные процессы также не наблюдались в РУ типа ОК-900, и проектные расчетные данные не предсказывали таких результатов. Эти обстоятельства потребовали поиска причин указанных явлений.

Целью данной работы является анализ возможных процессов, вызвавших повышение давления в первом контуре при разогреве РУ и его снижение через некоторое время после разогрева.

Основные задачи работы:

- исследование тепло-гидравлических процессов, происходящих в газовой системе компенсации давления в данном режиме, влияющих на температуру воды и газа в оборудовании системы компенсации;
- анализ процессов растворения и переноса газа в системе;
- разработка методик и выполнение расчетных оценок;
- разработка предложений по возможным вариантам модернизации системы и оптимизации режима разогрева.

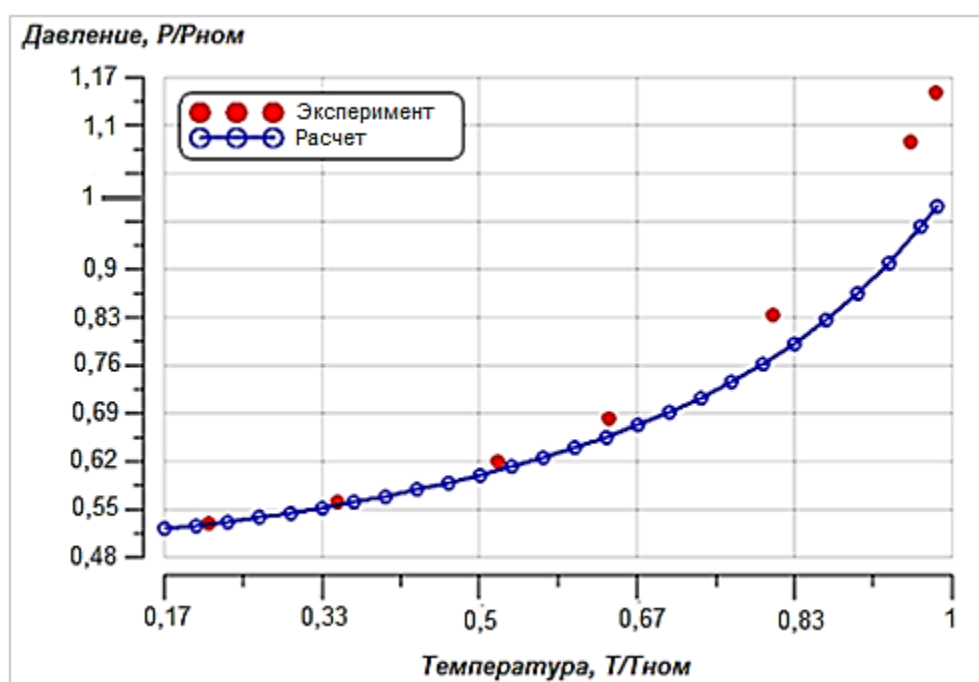


Рис. 1. Зависимость давления первого контура от температуры при разогреве РУ

Fig 1. Dependence of pressure of the primary circuit on temperature during heating of the reactor installation

Ранее в этом направлении были проведены исследования, результаты которых, в частности, опубликованы в [3]. В данной работе проанализированы процессы растворения, выделения и переноса газа в теплоносителе первого контура в РУ типа «РИТМ» и влияние этих процессов на изменение давления в режимах разогрева и расхолаживания. При этом принималось, что в режимах разогрева и нормальной работы температура воды и газа в КД и ГА остается одинаковой и неизменной. Однако данная предпосылка потребовала расчетного обоснования в связи с тем, что реально полученное давление в первом контуре в режиме разогрева установки при испытаниях оказалось существенно выше расчетного.

На первом этапе проведено исследование изменения температуры воды и газа в системе компенсации в режиме разогрева: разработана методика оценки температуры этих сред в режиме разогрева и выполнен расчет.

Методика расчета температур воды и газа в системе компенсации давления в режиме разогрева

Процессы тепломассопереноса при расчете температурных полей в оборудовании системы компенсации в режиме разогрева исследовались в соответствии с расчетной схемой (рис. 2).

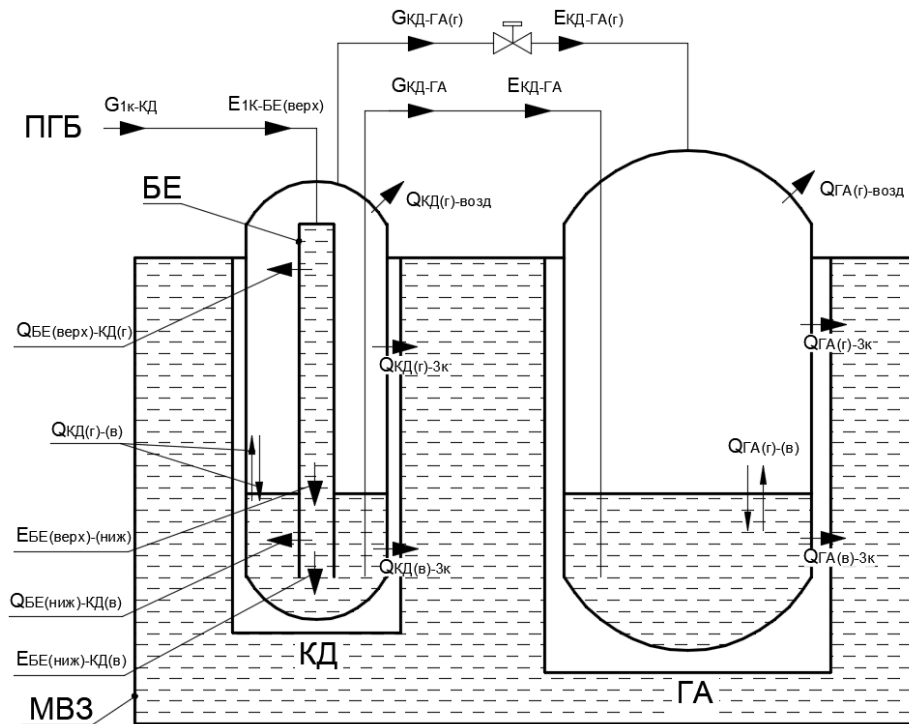


Рис. 2. Расчетная схема системы компенсации давления

Fig. 2. Calculation diagram of the pressure compensation system

Стрелками показаны:

- G_{i-j} – перенос массы воды (газа) от i к j ;
- E_{l-n} – передача тепла от l к n вместе с массой G_{i-j} ;
- Q_{l-n} – передача тепла через поверхность между l и n ;

$$E_{l-n} = G_{i-j} \cdot C_p(\bar{T}_{l-n}) \cdot \Delta T_{l-n}$$

$$Q_{l-n} = k_{l-n} \cdot F_{l-n} \cdot \Delta T_{l-n}$$

где $C_p(\bar{T}_{l-n})$ – изобарная теплоемкость при средней между l и n температуре $\bar{T}_{l-n} = \frac{T_l + T_n}{2}$; $\Delta T_{l-n} = T_n - T_l$; k_{l-n} – коэффициент теплопередачи, характеризующий теплообмен между l и n ; F_{l-n} – площадь теплообмена между l и n .

Индексы i, j, l, n указывают на емкость, из которой или в которую переносится масса или тепло. Например, $E_{\text{БЕ(ниж)-КД}}$ – означает передачу тепла от нижней части буферной емкости к КД вместе с массой воды расходом $G_{1к-КД}$; $Q_{\text{ГА(в)-(г)}}$ – характеризует теплообмен между водой и газом в ГА через поверхность испарения.

1. Уравнения сохранения энергии:

– для воды в верхней части БЕ:

$$m_{\text{БЕ(в)}}^{\text{верх}} \cdot \text{Cp}(T_{\text{БЕ}}^{\text{верх}}) \frac{dT_{\text{БЕ(в)}}^{\text{верх}}}{d\tau} = E_{1\text{к-БЕ(верх)}} - Q_{\text{БЕ(верх)-КД(г)}}, \quad (1)$$

где m – масса; T – температура; $\text{Cp}(T)$ – изобарная теплоемкость при температуре T ; τ – время;

– для воды в нижней части БЕ:

$$m_{\text{БЕ(в)}}^{\text{ниж}} \cdot \text{Cp}(T_{\text{БЕ}}^{\text{ниж}}) \frac{dT_{\text{БЕ(в)}}^{\text{ниж}}}{d\tau} = E_{\text{БЕ(верх)-БЕ(ниж)}} - Q_{\text{БЕ(ниж)-КД(в)}}; \quad (2)$$

– для воды в КД:

$$m_{\text{в}}^{\text{КД}} \cdot \text{Cp}(T_{\text{в}}^{\text{КД}}) \frac{dT_{\text{в}}^{\text{КД}}}{d\tau} = E_{\text{БЕ(ниж)-КД}} + Q_{\text{БЕ(ниж)-КД}} - Q_{\text{КД(в)-3к}} + Q_{\text{КД(в)-(г)}}, \quad (3)$$

где индекс 3к – вода третьего контура в баке МВЗ;

– для воды в ГА:

$$m_{\text{в}}^{\text{ГА}} \cdot \text{Cp}(T_{\text{в}}^{\text{ГА}}) \frac{dT_{\text{в}}^{\text{ГА}}}{d\tau} = E_{\text{КД-ГА}} - Q_{\text{ГА(в)-3к}} + Q_{\text{ГА(в)-(г)}}; \quad (4)$$

– для газа в КД:

$$m_{\text{г}}^{\text{КД}} \cdot \text{Cp}(T_{\text{г}}^{\text{КД}}) \frac{dT_{\text{г}}^{\text{КД}}}{d\tau} = Q_{\text{БЕ(верх)-КД(г)}} - Q_{\text{КД(г)-3к}} - Q_{\text{КД(г)-возд}} - Q_{\text{КД(в)-(г)}} + A_{\text{КД}}^{\text{газ}}, \quad (5)$$

где A – энергия сжатого газа, индекс возд – воздух в реакторном помещении;

– для газа в ГА:

$$m_{\text{г}}^{\text{ГА}} \cdot \text{Cp}(T_{\text{г}}^{\text{ГА}}) \frac{dT_{\text{г}}^{\text{ГА}}}{d\tau} = E_{\text{КД-ГА(г)}} - Q_{\text{ГА(г)-3к}} - Q_{\text{ГА(г)-возд}} - Q_{\text{ГА(в)-(г)}} + A_{\text{ГА}}^{\text{газ}}. \quad (6)$$

2. Уравнения сохранения массы:

– для воды в КД:

$$\frac{dm_{\text{в}}^{\text{КД}}}{d\tau} = G_{1\text{к-КД}} - G_{\text{КД-ГА}}; \quad (7)$$

– для воды в ГА:

$$\frac{dm_{\text{в}}^{\text{ГА}}}{d\tau} = G_{\text{КД-ГА}}. \quad (8)$$

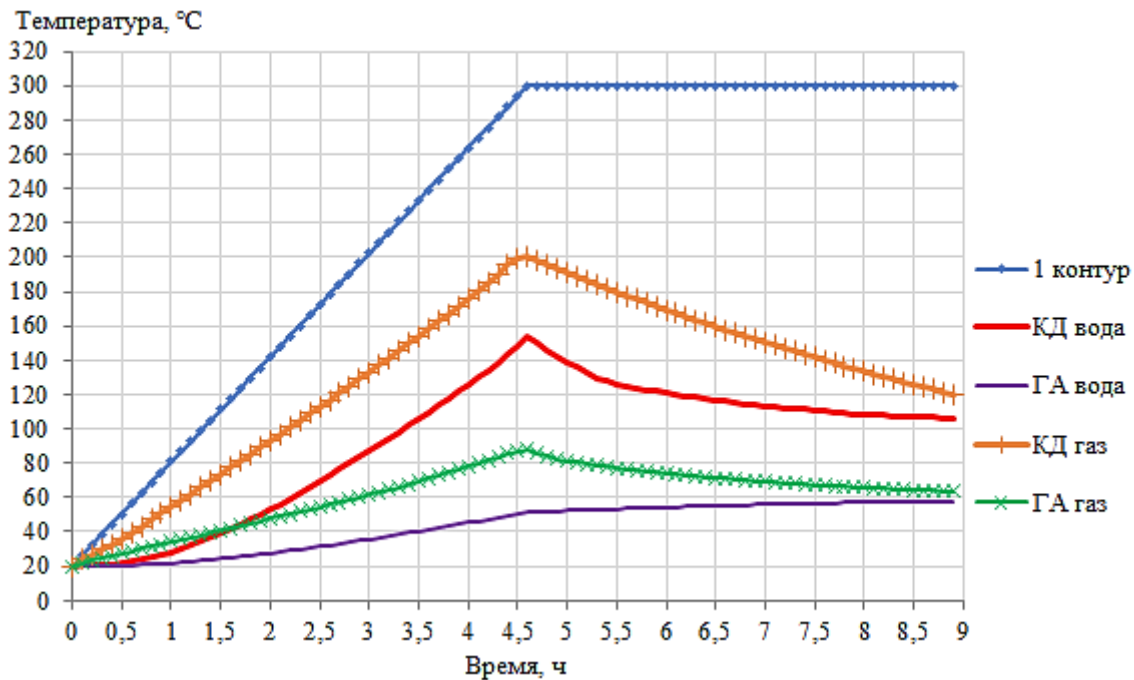
2. Уравнение сохранения количества движения газа из КД в ГА:

$$\frac{L_{\text{КД-ГА}}}{S_{\text{КД-ГА}}} \cdot \frac{dG_{\text{КД-ГА(г)}}}{d\tau} = (P_{\text{КД}} - P_{\text{ГА}} - \Delta P_{\text{пот}}), \quad (9)$$

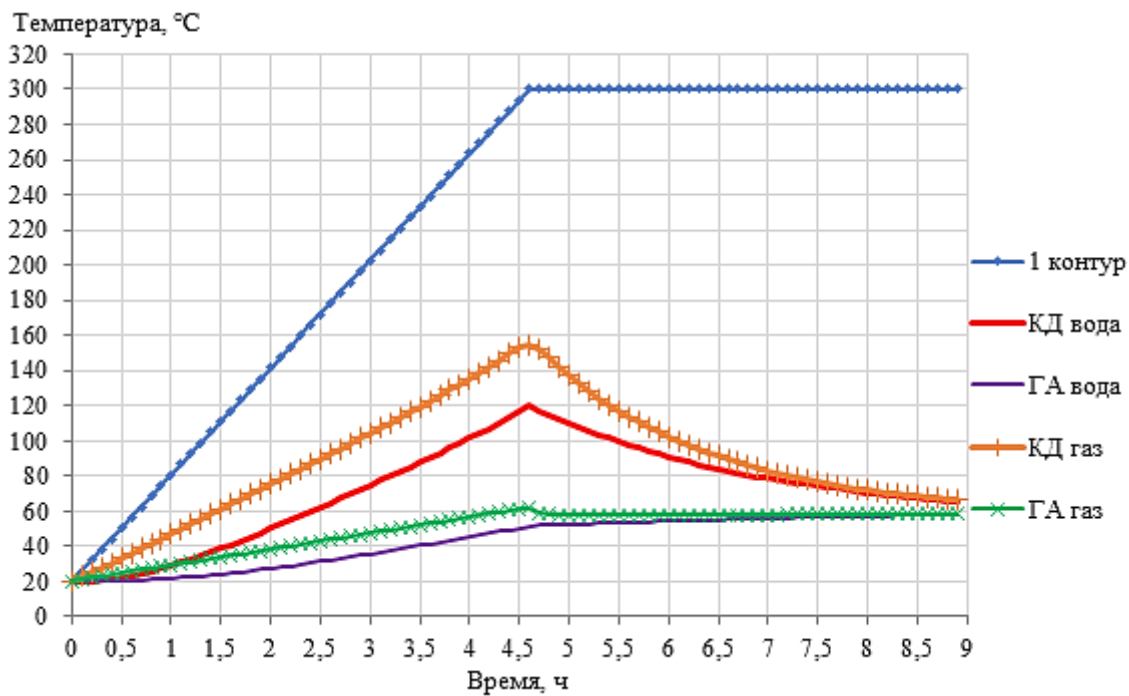
где $L_{\text{КД-ГА}}$, $S_{\text{КД-ГА}}$ – длина и площадь проходного сечения трубопровода, соединяющего КД и ГА по газу; $P_{\text{КД}}$, $P_{\text{ГА}}$ – давление в КД, ГА; $\Delta P_{\text{пот}}$ – потери давления.

Для расчета температур использовались следующие исходные данные: $P_0 = 6,6$ МПа – давление первого контура в расхоленном состоянии; $T_0 = 20$ °С – температура в расхоленном состоянии; $\bar{T}_{1\text{к}} = 300$ °С – средняя температура теплоносителя в номинальном режиме; $V_{1\text{к}} = 25\text{ м}^3$ – объем первого контура (без СКД); $V^{\text{КД}} = 6,8$ м³ – объем КД; $V^{\text{ГА}} = 15$ м³ – объем ГА; $V_{\text{пз}}^{\text{КД}} = 2,72$ м³, $V_{\text{пз}}^{\text{ГА}} = 6$ м³ – объемы первоначальной заливки в КД и ГА соответственно. Скорость разогрева РУ выбрана усредненной 60 °С/ч, при максимальных значениях 50 °С/ч до достижения 200 °С и 100 °С/ч, начиная от 200 °С. Результаты расчета температур при решении системы уравнений (1)-(9) представлены на рис. 3 (а).

Расчет был проведен по схеме (рис. 2), в которой КД и ГА расположены в «сухом» кессоне, их охлаждение происходит водой бака металловодной защиты (МВЗ) через слой воздуха. Оценочный расчет проведен и для другой схемы, в которой КД и ГА размещены непосредственно в воде бака МВЗ. Результаты приведены на рис. 3 (б).



а)



б)

Рис. 3. Распределение температур в первом контуре и системе компенсации в режиме разогрева при размещении элементов системы: а) в «сухом» кессоне; б) в воде бака МВЗ

Fig. 3. Temperature distribution in the primary circuit and compensation system in the heating mode when placing system elements: a) in a «dry» caisson; b) in the water of the metal-water protection tank

Результаты расчета показывают большой рост температур воды и газа в компенсаторе при разогреве РУ. При расположении КД в «сухом» кессоне температуры газа и воды в нем в конце разогрева достигают соответственно 200 и 150 °С, при размещении КД в воде бака МВЗ – соответственно 160 и 120 °С. Проектное значение температуры в системе компенсации со-

ставляют 60 °С, что значительно ниже полученных результатов. Из расчета следует, что основное влияние на повышение температуры в режиме разогрева оказывает буферная емкость, в которой вода находится при высокой температуре. Размещение компенсатора давления в воде бака МВЗ существенного снижения температуры не вызвало. На втором этапе выполнен анализ влияния изменения температуры воды и газа в системе компенсации на давление в первом контуре, разработана методика оценки данного изменения, проведены оценочные расчеты.

Методика расчета изменения давления в первом контуре при изменении температуры в системе компенсации в режиме разогрева

Масса воды, вытесненной из первого контура в систему компенсации:

$$m_{\text{ВВ}} = V_{1\text{К}}(\rho_{0\text{В}} - \rho_{1\text{В}}), \quad (10)$$

где $\rho_{0\text{В}}, \rho_{1\text{В}}$ – плотности воды в первом контуре в начале и конце разогрева.

Масса воды первоначальной заливки в КД и ГА:

$$m_{\text{ПЗ}}^{\text{КД}} = V_{\text{ПЗ}}^{\text{КД}} \cdot \rho_{0\text{В}} m_{\text{ПЗ}}^{\text{ГА}} = V_{\text{ПЗ}}^{\text{ГА}} \cdot \rho_{0\text{В}}. \quad (11)$$

В конце разогрева уровни воды в КД и ГА различны из-за разности температур.

Условие равновесия исходит из равенства гидростатических давлений:

$$\rho_{1\text{В}}^{\text{КД}} \cdot h_{1\text{В}}^{\text{КД}} = \rho_{1\text{В}}^{\text{ГА}} \cdot h_{1\text{В}}^{\text{ГА}}, \quad (12)$$

где $\rho_{1\text{В}}^{\text{КД}}, \rho_{1\text{В}}^{\text{ГА}}$ – плотности воды в конечном состоянии; $h_{1\text{В}}^{\text{КД}}, h_{1\text{В}}^{\text{ГА}}$ – установившиеся высоты в КД и ГА.

Представляя высоту как отношение объема к площади поперечного сечения, а объем как отношение массы к плотности и учитывая (12), получаем соотношение:

$$\frac{m_{1\text{В}}^{\text{КД}}}{S_{\text{КД}}} = \frac{m_{1\text{В}}^{\text{ГА}}}{S_{\text{ГА}}}, \quad (13)$$

где $m_{1\text{В}}^{\text{КД}}, m_{1\text{В}}^{\text{ГА}}$ – массы воды в конечном состоянии; $S_{\text{КД}}, S_{\text{ГА}}$ – площади поперечных сечений, $\frac{S_{\text{КД}}}{S_{\text{ГА}}} = 0,45$.

По закону сохранения массы воды в СКД:

$$m_{\Sigma} = m_{\text{ВВ}} + m_{\text{ПЗ}}^{\text{КД}} + m_{\text{ПЗ}}^{\text{ГА}} = m_{1\text{В}}^{\text{КД}} + m_{1\text{В}}^{\text{ГА}} = \text{const} \quad (14)$$

Установившиеся объемы воды в КД и ГА:

$$V_{1\text{В}}^{\text{КД}} = \frac{m_{1\text{В}}^{\text{КД}}}{\rho_{1\text{В}}^{\text{КД}}} V_{1\text{В}}^{\text{ГА}} = \frac{m_{1\text{В}}^{\text{ГА}}}{\rho_{1\text{В}}^{\text{ГА}}}. \quad (15)$$

Объемы газа в КД и ГА в конце разогрева:

$$V_{1\text{Г}}^{\text{КД}} = V^{\text{КД}} - V_{1\text{В}}^{\text{КД}} V_{1\text{Г}}^{\text{ГА}} = V^{\text{ГА}} - V_{1\text{В}}^{\text{ГА}}. \quad (16)$$

Уравнения состояния газа в КД и ГА в начале и конце разогрева:

$$P_0 V_{0\text{Г}}^{\text{КД}} = m_{0\text{Г}}^{\text{КД}} R T_0 P_0 V_{0\text{Г}}^{\text{ГА}} = m_{0\text{Г}}^{\text{ГА}} R T_0, \quad (17)$$

$$P_1 V_{1\text{Г}}^{\text{КД}} = m_{1\text{Г}}^{\text{КД}} R T_{1\text{Г}}^{\text{КД}} P_1 V_{1\text{Г}}^{\text{ГА}} = m_{1\text{Г}}^{\text{ГА}} R T_{1\text{Г}}^{\text{ГА}}, \quad (18)$$

где P_1 – давление в первом контуре в конце разогрева, $T_{1\text{Г}}^{\text{КД}}, T_{1\text{Г}}^{\text{ГА}}$ – температуры газа в конце разогрева в КД и ГА соответственно, $m_{0\text{Г}}^{\text{КД}}, m_{0\text{Г}}^{\text{ГА}}$ – начальные массы газа, $m_{1\text{Г}}^{\text{КД}}, m_{1\text{Г}}^{\text{ГА}}$ – конечные массы газа после разогрева, R – газовая постоянная.

Давление P_1 в КД и ГА одинаково, выражение (18) записывается:

$$\frac{m_{1\text{Г}}^{\text{КД}}}{V_{1\text{Г}}^{\text{КД}}} T_{1\text{Г}}^{\text{КД}} = \frac{m_{1\text{Г}}^{\text{ГА}}}{V_{1\text{Г}}^{\text{ГА}}} T_{1\text{Г}}^{\text{ГА}}. \quad (19)$$

В процессе разогрева газ массой Δm перемещается из КД в ГА. С учетом (17)-(19) формируется система:

$$\begin{cases} m_{1Г}^{КД} = m_{0Г}^{КД} - \Delta m \\ m_{1Г}^{ГА} = m_{0Г}^{ГА} + \Delta m \\ \frac{m_{1Г}^{КД}}{V_{1Г}^{КД}} T_{1Г}^{КД} = \frac{m_{1Г}^{ГА}}{V_{1Г}^{ГА}} T_{1Г}^{ГА} \\ \frac{P_1}{P_0} = \frac{V_{0Г}^{КД}}{V_{1Г}^{КД}} \cdot \frac{m_{1Г}^{КД}}{m_{0Г}^{КД}} \cdot \frac{T_{1Г}^{КД}}{T_0} \end{cases} \quad (20)$$

Данные для расчета давления в конце разогрева взяты из предыдущего раздела: начальное давление P_0 , объемы воды и газа, температуры воды и газа в КД и ГА (рис. 3). При решении системы (20), с учетом (10)-(16), получены следующие результаты: давление первого контура в конце разогрева при расположении КД и ГА в «сухом» кессоне $P_1 = 19,47$ МПа; при расположении в воде бака МВЗ – $P_1 = 17,52$ МПа. Высокая температура в компенсаторе в конце разогрева вызывает существенный рост давления в первом контуре. При размещении оборудования в «сухом» кессоне давление превышает номинальное значение на 3,38 МПа, при размещении в воде бака МВЗ – на 1,43 МПа.

На третьем этапе проведена оценка влияния растворения газа в теплоносителе после разогрева на снижение давления.

Оценка влияния растворения газа в теплоносителе после разогрева на снижение давления в первом контуре

В процессе разогрева, который длится около пяти часов, вода из первого контура вытесняется в систему компенсации, при этом газоперенос из системы компенсации в первый контур отсутствует. Дополнительное растворение газа в воде системы компенсации при установившемся давлении после разогрева происходит медленно и занимает более сотни часов [4], поэтому количеством растворившегося газа в воде системы компенсации за время разогрева можно пренебречь.

При дальнейшей длительной работе РУ после разогрева с температурой в КД и ГА на уровне $T_{уст} = 60^\circ\text{C}$ и давлении $P_{1к} = 16,09$ МПа продолжается растворение газа в воде КД и ГА и перенос его за счет массообмена в воду первого контура до достижения равновесной концентрации при установившихся параметрах [4]. Давление при этом снижается.

$$P'_{1к} = P_{1к} \frac{V_{Г} - V_{рас}}{V_{Г}}, \quad (21)$$

где $V_{Г} = 6,1\text{м}^3$ – суммарный объем газа в СКД до растворения, $V_{рас}$ – объем газа, растворившегося в воде СКД и первого контура.

Перед разогревом установки ($P_0 = 6,6\text{МПа}$, $T_0 = 20^\circ\text{C}$) вода первого контура и системы компенсации содержит растворенный газ концентрацией C_0 . После процессов разогрева, стабилизации температур в СКД, растворения газа его концентрация в воде равна C . Объем растворившегося газа:

$$V_{рас} = (C - C_0) \cdot m_{в}^{сум}, \quad (22)$$

где $m_{в}^{сум}$ – суммарная масса воды в первом контуре и системе компенсации.

По закону Генри:

$$C_0 = k(T_0) \cdot (P_0 - P_S(T_0)), \quad (23)$$

$$C = k(T_{уст}) \cdot (P_{1к} - P_S(T_{уст})), \quad (24)$$

где $k(T)$ – коэффициент Генри при температуре T , $P_S(T)$ – давление насыщенных паров при T .

Результаты решения уравнения (21), с учетом (22)-(24) показали снижение давления в первом контуре за счет дополнительного растворения газа с 16,09 МПа до 15,58 МПа, т.е. на 0,51 МПа. Если разогрев установки производится после расхолаживания со снятием давления до атмосферного, то падение давления практически удваивается [3]. Длительная работа установки с такими отклонениями от номинального давления предполагается недопустимой.

Заключение

Анализ процессов тепломассопереноса в газовой системе компенсации давления при разогреве РУ показал следующие результаты: температура воды и газа в компенсаторе в режиме разогрева повышается и значительно превышает проектные значения в конце разогрева; это приводит к превышению номинального давления в первом контуре на 3,38 МПа при размещении оборудования системы компенсации в «сухом» кессоне и на 1,43 МПа – при размещении в воде бака МВЗ.

В процессе дальнейшей работы установки после разогрева происходит растворение газа в воде системы компенсации до равновесной концентрации при установившемся давлении и перенос его в первый контур до выравнивания концентраций. При этом часть газа дополнительно уходит в раствор, что вызывает снижение давления на 0,51 МПа относительно номинального при любом размещении оборудования системы компенсации. Такие отклонения давления в первом контуре в рассматриваемом режиме существенно превышают допустимые и требуют поиска решений.

Для снижения влияния на давление температуры газа в системе компенсации при разогреве и нормальной работе установки предлагаются следующие три варианта.

1. Увеличить объем газа в СКД, при этом большую его часть разместить в кондиционируемом помещении с регулируемой температурой для поддержания давления в узком диапазоне, например, в аппаратной, как это было на установках типа ОК-900 на атомных судах и плавучей атомной станции.
2. Исключить из компенсатора буферную емкость и установить ее в виде отдельной конструкции на трубопроводе между ПГБ и компенсатором.
3. Снизить скорость разогрева установки.

Для снижения влияния на уменьшение давления растворения газа в воде СКД и первого контура предлагается снизить объем воды в СКД за счет исключения гидроаккумуляторов из системы компенсации и уменьшения объема воды первоначальной заливки, а также увеличить объем газа в системе компенсации.

При проектировании РУ с ВВР и газовой системой компенсации давления необходимо учитывать процессы, рассмотренные в данной работе, и анализировать альтернативные варианты систем, в том числе, паровую систему компенсации.

Библиографический список

1. Коэн, П. Технология воды энергетических реакторов / П. Коэн. – 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. 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.
4. 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: 01.04.2024*

*Дата принятия
к публикации: 25.04.2024*