

УДК 621.039.5

А.Ф. Филимонов, В.И. Полуничев, А.Е. Помысухина

ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕ И ГАЗОПЕРЕНОС В ОБОРУДОВАНИИ ПЕРВОГО КОНТУРА РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ С ГАЗОВОЙ СИСТЕМОЙ КОМПЕНСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлен анализ процессов газопереноса и газовыделения в оборудовании первого контура реакторной установки (РУ) с газовой системой компенсации давления. Рассмотрены процессы растворимости азота в воде первого контура РУ. Проанализированы три режима работы установки: номинальный, нормального и ремонтного расхолаживания. Для каждого из них рассматривается предельный случай, при котором растворение выделившегося в контуре газа не учитывается в связи с малой скоростью процесса. Для режимов нормального и ремонтного расхолаживания количественно оценены объемы выделившегося в контур газа. Проведен анализ полученных результатов на основании экспериментальных данных швартовых испытаний РУ плавучего энергоблока «Академик Ломоносов».

Ключевые слова: нормальное и ремонтное расхолаживание РУ, газовая система компенсации давления, равновесная концентрация газа, газовыделение, газоперенос.

Введение

Основным источником газа в теплоносителе первого контура является азот газовой системы компенсации давления [1]. При длительном контакте азота с водой КД устанавливается равновесная концентрация раствора. При работе реакторных установок (РУ) происходит массообмен теплоносителя между реактором и компенсатором давления (КД) вследствие изменения средней температуры в первом контуре. Это приводит к выравниванию концентраций растворенного газа в КД и теплоносителе первого контура. По опыту эксплуатации судовых РУ достижение равновесной концентрации происходит за 1-1,5 месяца работы на мощности [2]. Повышенное удельное газосодержание, а также различие условий растворимости газа в теплоносителе, на отдельных участках контура при разных режимах работы установки может привести к выделению газа из раствора и нарушению нормальной работы оборудования первого контура. Также наличие растворенного азота системы компенсации в теплоносителе первого контура [5,6] вызывает более раннее начало пристенного «газового» кипения водогазового раствора на оболочках твэлов, по сравнению с дегазированной водой, что приводит к повышенной температуре оболочки и топлива, повышению отложений на оболочке, возрастанию рисков взаимодействия пара с циркониевыми элементами ТВС [7].

В настоящей статье рассмотрены три режима работы установки: номинальный, режимы нормального и ремонтного расхолаживания. Для каждого из них рассматривается предельный случай, при котором растворение выделившегося в контуре газа не учитывается в связи с малой скоростью процесса.

Номинальный режим работы установки с очисткой теплоносителя первого контура

Рассматриваемый циркуляционный тракт теплоносителя в режиме нормальной работы реакторной установки изображен на рис.1.

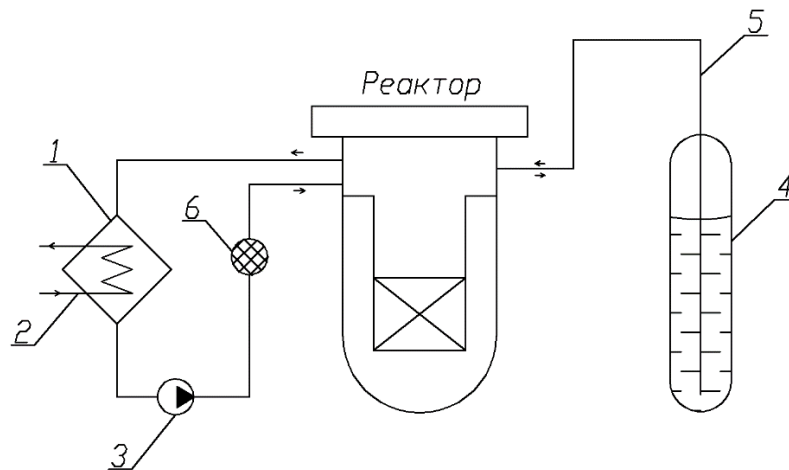


Рис. 1. Схема реакторной установки с работой систем очистки и компенсации давления в номинальном режиме:

- 1 – теплообменник первого-третьего контуров (ТО₁₋₃), 2 – охлаждающая вода ТО₁₋₃,
3 – насос расхоложивания, 4 – система компенсации давления, 5 – трубопровод,
6 – ионообменный фильтр

Предполагается, что вода в КД имеет температуру, которая зависит от интенсивности массообмена с реактором и теплообмена с окружающей средой. Уравнение, описывающее повышение концентрации азота в воде КД с течением времени можно записать в виде [2] (1):

$$C_{\text{КД}} = C_{\text{КД}}^{\text{н}} \cdot (1 - e^{-\frac{\alpha S}{V_{\text{КД}}} t}), \quad (1)$$

где $C_{\text{КД}}^{\text{н}} = K \cdot P_{\text{г}}$ – равновесная концентрация азота в массе воды в КД определенная по закону Генри [4]; K – коэффициент Генри; $P_{\text{г}}$ – парциальное давление газа; S – площадь поверхности раздела фаз в КД; α – коэффициент массообмена между водной и газовой фазой КД (зависит от интенсивности перемешивания воды в КД); $V_{\text{КД}}$ – объем воды компенсаторов давления РУ.

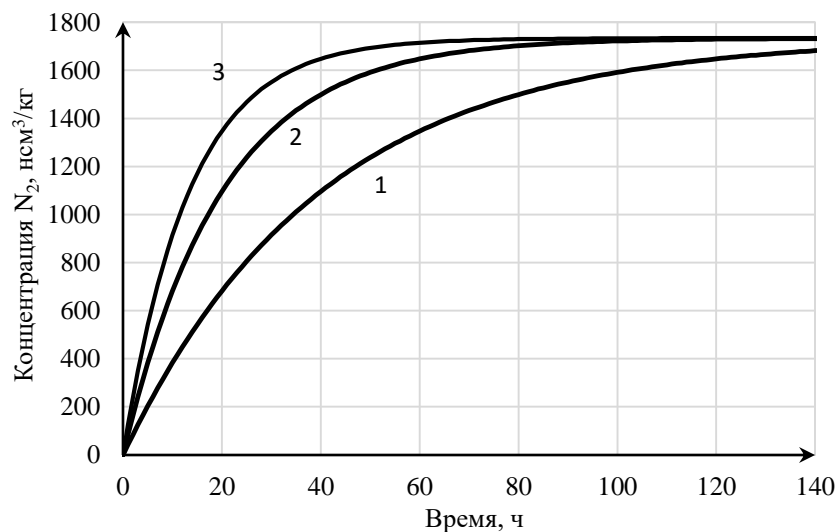


Рис. 2. Накопление газа в воде КД:

- 1 - $\alpha = 0,05$ м/ч; 2 - $\alpha = 0,1$ м/ч; 3 - $\alpha = 0,15$ м/ч

На рис. 2 показан характер повышения концентрации растворенного азота в воде КД во времени при подключении системы компенсации к реактору в начале работы РУ. При $C_{\text{КД}}^{\text{н}} = 1734 \text{ нсм}^3/\text{кг}$, $V_{\text{КД}} = 2 \text{ м}^3$, $S = 1 \text{ м}^2$. Из графика видно, что в реальных реакторных системах насыщение воды КД азотом ($C_{\text{КД}} = C_{\text{КД}}^{\text{н}}$) происходит достаточно быстро (примерно 120 час с момента подачи газа в КД). При номинальном режиме работы установки с очисткой теплоносителя первого контура на ионообменном фильтре (рис. 1) вероятным источником газыделения из теплоносителя является ТО_{1-3} , в котором температура теплоносителя снижается до 40-50 °С, необходимой для работы фильтра, проходя 80 °С – температуру минимальной растворимости азота в воде [3].

Уравнение, описывающее равновесную концентрацию в системе в зависимости от времени будет иметь вид (2):

$$\rho \cdot V_o \cdot \frac{dC}{dt} = G_{\text{ТО}_{1-3}} \cdot C_{\text{min}} + G_{\text{КД}} \cdot C_{\text{КД}} - G_{\text{ТО}_{1-3}} \cdot C_{1\text{К}} - G_{\text{КД}} \cdot C_{1\text{К}}, \quad (2)$$

где $G_{\text{ТО}_{1-3}}$, $G_{\text{КД}}$ – расход теплоносителя в системе очистки и массообмен между реактором и контуром очистки и между КД и реактором соответственно; C_{min} – минимальная равновесная концентрация азота в теплоносителе ТО_{1-3} ; $C_{1\text{К}}$ – равновесная концентрация азота в массе воды первого контура; V_o – исходный объем первого контура (без КД); ρ – плотность теплоносителя в реакторе при средней температуре.

На рис. 3 приведено изменение концентрации растворенного азота в теплоносителе первого контура во времени при подключении системы очистки к реактору (проработавшему более 50 часов без системы очистки), концентрация растворенного газа в котором исходно соответствует равновесной концентрации при параметрах КД, рассчитанное по уравнению (2). При этом принимаются следующие исходные данные: $\rho = 1001 \text{ м}^3/\text{кг}$, $V_o = 26 \text{ м}^3$, $G_{\text{ТО}_{1-3}} = 1,7 \text{ кг/с}$, $G_{\text{КД}} = 0,01 \text{ кг/с}$, $C_{\text{min}} = 1179 \text{ нсм}^3/\text{кг}$, $C_{\text{КД}} = C_{1\text{К}} = 1734 \text{ нсм}^3/\text{кг}$.

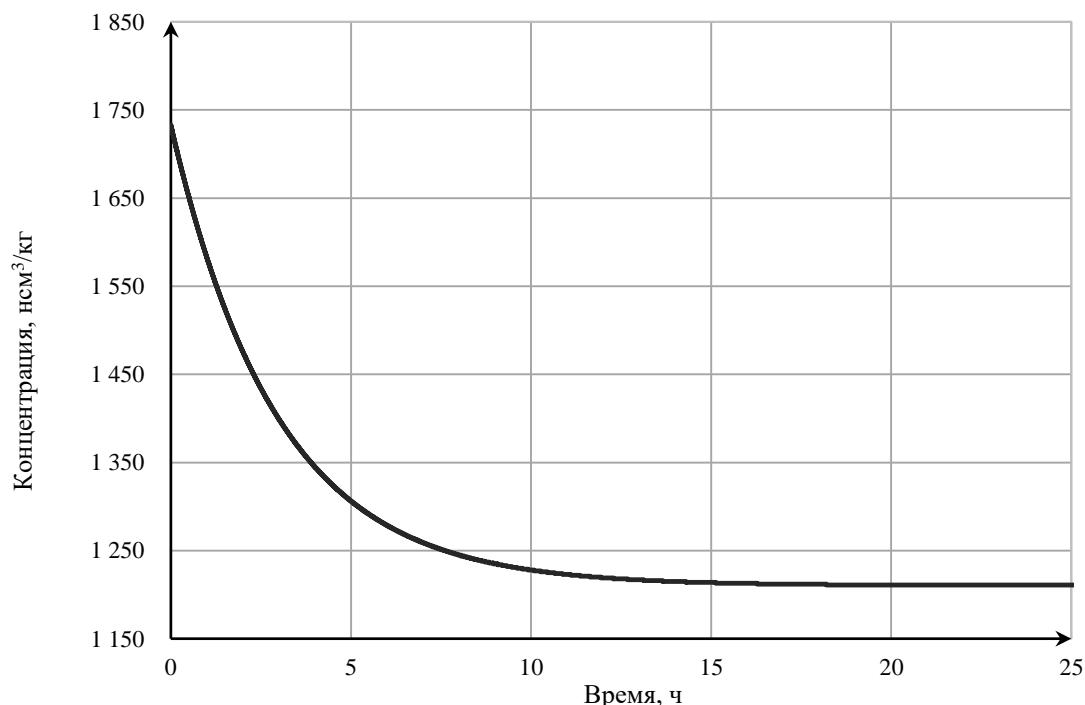


Рис. 3. Изменение концентрации растворенного азота в теплоносителе первого контура во времени при подключении системы очистки в РУ КЛТ-40С

Как видно из графика, изменение концентрации в системе с течением времени прекращается и достигает постоянного значения, равного $1210 \text{ нсм}^3/\text{кг}$. Полученное значение для установившейся равновесной концентрации подтверждается результатами замеров, выполненных на РУ действующих атомных ледоколов (порядка $1300 \text{ нсм}^3/\text{кг}$).

Нормальное расхолаживание РУ через парогенератор (ПГ)

Предполагается, что перед расхолаживанием РУ работала на мощности не менее одного месяца при номинальных параметрах теплоносителя первого контура без системы очистки. Оценка процессов газовыделения и газопереноса проводится для основных элементов энергетического оборудования: реактора и КД (рис. 1).

Перед расхолаживанием в реакторе устанавливается равновесная концентрация растворенного газа, определяемая парциальным давлением газа и температурой воды в компенсаторе в соответствии с законом Генри (3):

$$C_{\text{КД}}^o = C_{1\text{К}}^o = K(T_{\text{КД}}) \cdot (P_{\text{КД}}^o - P_S(T_{\text{КД}})), \quad (3)$$

где $C_{1\text{К}}^o$ – равновесная концентрация растворенного в теплоносителе первого контура газа перед расхолаживанием; $K(T_{\text{КД}})$ – коэффициент Генри при температуре в КД; Температура воды в КД перед и в процессе расхолаживания принимается постоянной; $P_{\text{КД}}^o = P_{1\text{К}}^o$ – давление в КД перед расхолаживанием; $P_S(T_{\text{КД}})$ – давление насыщенных паров воды при температуре в КД.

В процессе расхолаживания происходят следующие изменения параметров теплоносителя первого контура: в реакторе снижается температура и давление, происходит пополнение реактора водой системы компенсации, в КД снижается уровень при постоянной температуре. Соответственно изменениям параметров теплоносителя изменяются и равновесные концентрации растворенного в нем газа.

Текущая концентрация растворенного газа в воде КД определится из следующего соотношения (4):

$$C_{\text{КД}} = K(T_{\text{КД}}) \cdot (P_{1\text{К}} - P_S(T_{\text{КД}})), \quad (4)$$

где $P_{1\text{К}} = P_{1\text{К}}^o \cdot V_{\text{Г}}^o / (V_{\text{Г}}^o + \Delta V_{\text{В}})$ – текущее давление в первом контуре в процессе расхолаживания; $V_{\text{Г}}^o$ – объем газа в исходном состоянии; $\Delta V_{\text{В}} = \Delta G \cdot v$ – объем воды, перенесенный из КД в реактор; $\Delta V_{\text{В}} = \Delta V_{\text{Г}}$ – объем перенесенной воды в реактор равен изменению объема газа в системе; $\Delta G = V^0 \cdot \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{v^0}\right)$ – масса воды, перенесенная из КД в реактор; V^0 – исходный объем воды в первом контуре без КД; v^0, v – удельный объем теплоносителя в реакторе перед и в процессе расхолаживания соответственно.

Исходная концентрация газа в массе воды КД $C_{\text{КД}}^o$, по мере поступления из КД в реактор, снижается пропорционально снижению давления.

Текущая концентрация линейно зависит от давления, поэтому средняя концентрация газа в массе воды КД, поступающей в реактор, определится как (5):

$$C_{\text{КД,ср}} = \frac{(C_{\text{КД}}^o - C_{\text{КД}})}{2}, \quad (5)$$

Равновесная концентрация газа в исходной массе теплоносителя в первом контуре в процессе расхолаживания (6):

$$C_{1\text{К}} = K(T_{1\text{К}}) \cdot (P_{1\text{К}} - P_S(T_{1\text{К}})), \quad (6)$$

где $K(T_{1\text{К}})$ – коэффициент Генри при текущей температуре теплоносителя первого контура в процессе расхолаживания.

Расхолаживание РУ ведется при принудительной циркуляции теплоносителя, поэтому при малой мощности остаточных тепловыделений температура теплоносителя в реакторе принимается одинаковой во всем объеме. Отвод тепла ведется через ПГ.

Объем газа, выделившегося из исходной массы воды в реакторе в процессе расхолаживания, определяется соотношением (7):

$$V_{г.1К} = \Delta C_{1К} \cdot G, \quad (7)$$

где $\Delta C_{1К} = C_{1К}^o - C_{1К}$ – изменение равновесной концентрации газа в исходной массе воды первого контура при расхолаживании может быть как положительным, так и отрицательным, но т.к. рассматривается предельный случай, то отрицательные значения изменения концентрации не учитываются; G – исходная масса воды в первом контуре.

На рис. 4 представлено изменение объема выделившегося газа из исходной массы воды первого контура (без КД), равной 26 т в процессе расхолаживания с 300 до 70 °С.

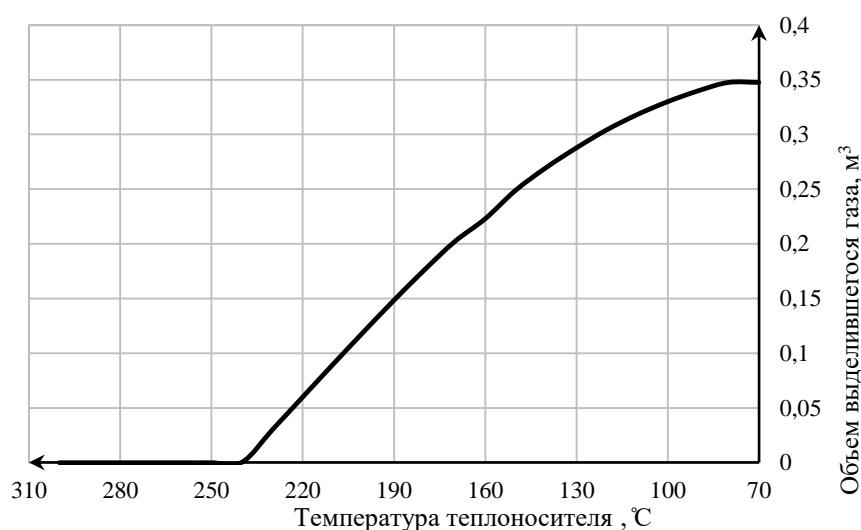


Рис. 4. Объем выделившегося газа из исходной массы воды в первом контуре

Объем выделившегося в реакторе газа из массы воды, поступившей из КД (8):

$$V_{г.КД \rightarrow Р} = \Delta C_{КД \rightarrow Р} \cdot \Delta G, \quad (8)$$

где $\Delta C_{КД \rightarrow Р} = C_{КД,ср} - C_{1К}$ – изменение предельной концентрации газа в массе воды, поступившей из КД в реактор при расхолаживании.

На рис. 5 представлено изменение объема выделившегося газа из массы воды КД, поступившей в реактор в процессе расхолаживания при постоянной температуре воды КД.

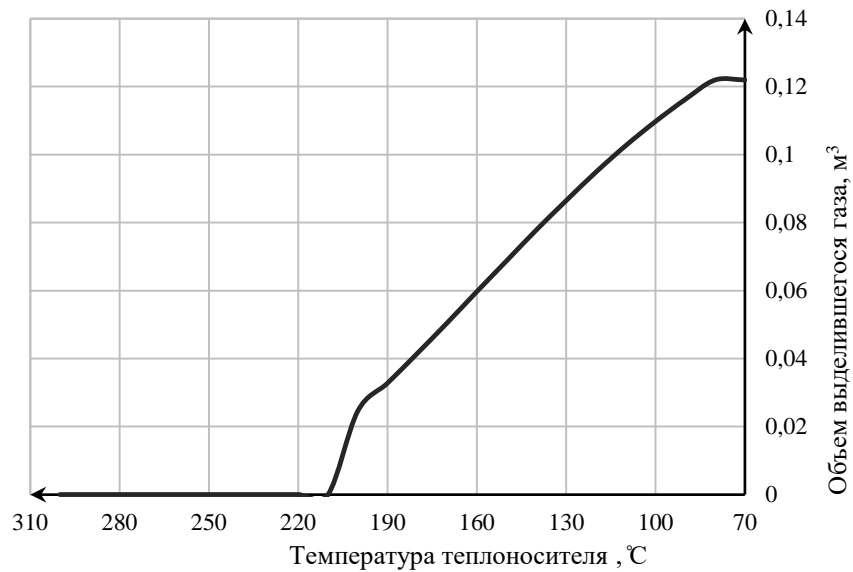


Рис. 5. Объем выделившегося газа из массы воды, поступившей из КД в реактор

Суммарный объем газа, выделившегося в реакторе в процессе расхолаживания (9):

$$V_{\Sigma,г} = V_{г,Р} + V_{г,КД \rightarrow Р}. \quad (9)$$

На рис. 6 показано общее накопление азота в первом контуре в газообразной форме в процессе нормального расхолаживания.

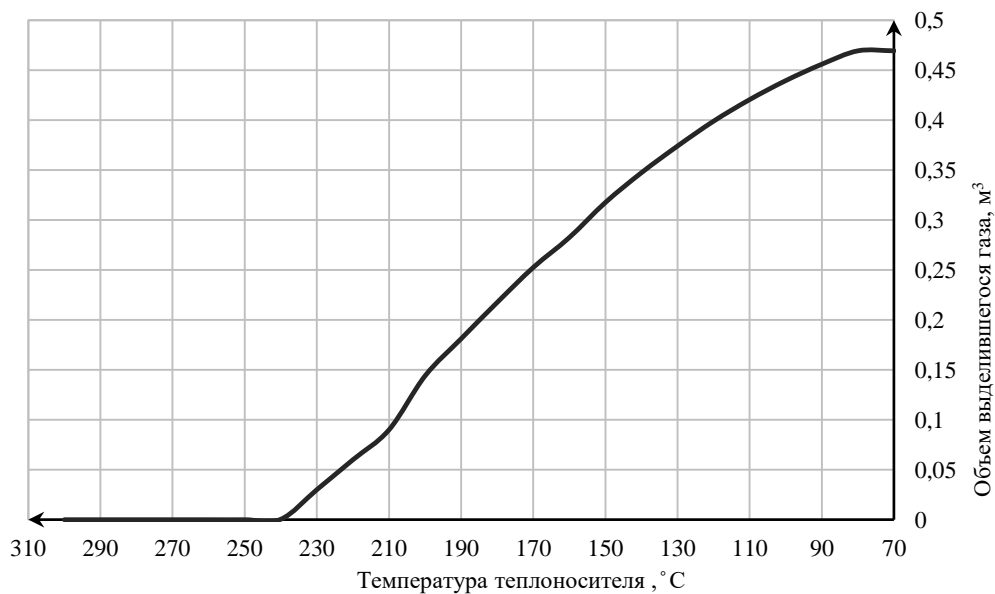


Рис. 6. Общий объем выделившегося газа в рассматриваемом оборудовании первого контура

Из рис. 6. видно, что общий объем выделившегося в реакторе газа превышает объем приводов СУЗ, который составляет ~100 л, поэтому в процессе работы они достаточно быстро заполняются газом. Остальная часть газа переносится в виде водо-газовой эмульсии в другое оборудование и там сепарируется. О наличии водо-газовой эмульсии в контуре очистки при снижении температуры теплоносителя первого контура до 210 °C и ниже свиде-

тельствует неустойчивое показание ультразвукового расходомера при швартовных испытаниях РУ ПАТЭС «Академик Ломоносов» (рис. 7).

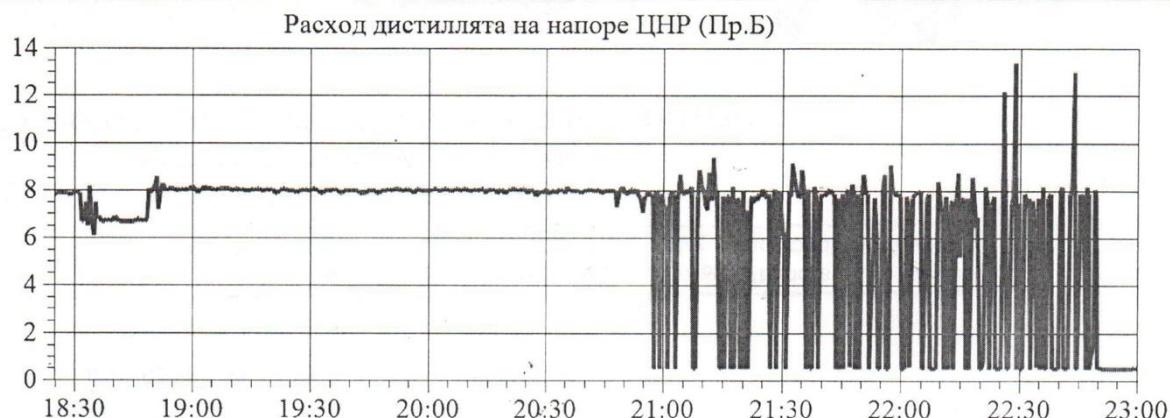


Рис. 7. Изменение показаний расходомера в режиме ремонтного расхолаживания РУ при швартовных испытаниях ПЭБ

Ремонтное расхолаживание РУ

Циркуляционный тракт теплоносителя, рассматриваемый в режиме ремонтного расхолаживания РУ, изображен на рис.8.

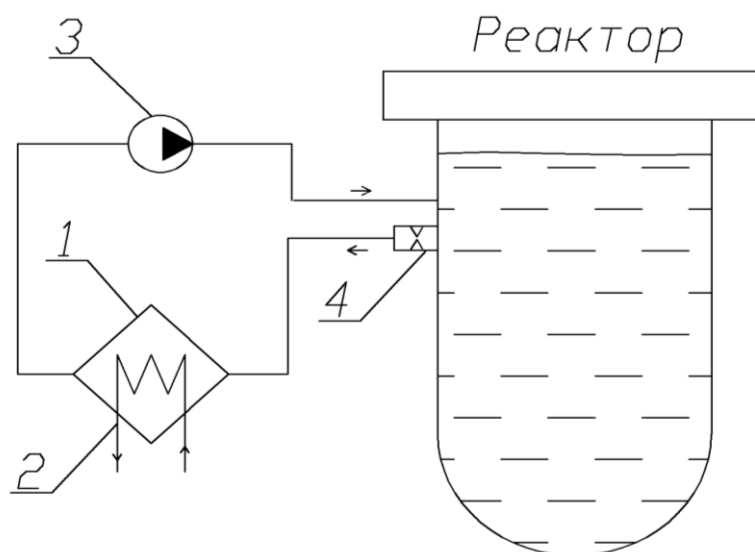


Рис. 8. Схема циркуляции теплоносителя в режиме ремонтного расхолаживания:

- 1 – теплообменник первого-третьего контуров (ТО₁₋₃), 2 – охлаждающая вода ТО₁₋₃,
3 – насос расхолаживания, 4 – сужающее устройство на выходе из реактора

В режиме ремонтного расхолаживания циркуляция осуществляется через контур, в котором основными элементами энергетического оборудования являются: сужающее устройство (СУ), на выходе из реактора предназначенное для снижения скорости истечения теплоносителя при обрыве патрубка реактора к системе расхолаживания, ТО₁₋₃ и циркуляционный насос расхолаживания (ЦНР). Рассматривается случай при расходе в контуре расхолаживания, равном G_p , атмосферном давлении и интервале температур теплоносителя в реакторе до 30 °С.

В данном режиме выполняется оценка объемного газосодержания в теплоносителе на входе в рабочее колесо ЦНР, так как оно влияет на работоспособность насоса. Из экспе-

риментальных исследований работы насосов следует, что при содержании газовой фазы в количестве 4 объемных процентов на входе в насос имеется высокая вероятность его кавитации.

Равновесная концентрация газа в теплоносителе, который находится в реакторе (10):

$$C_P = K(T_P) \cdot (P_P - P_S(T_P)), \quad (10)$$

где $K(T_P)$ – коэффициент Генри для температуры в рассматриваемой точке при T_P – температуре в реакторе в процессе ремонтного расхолаживания; $P_P = P_{\text{атм.}}$ – давление в реакторе при расхолаживании; $P_S(T_P)$ – давление насыщенных паров воды при температуре в рассматриваемой точке.

Для определения места газовыделения в контуре расхолаживания необходимо сравнить предельные концентрации растворенной в теплоносителе воздушной смеси для каждого из элементов энергетического оборудования.

Равновесная концентрация газа в теплоносителе, проходящем через СУ (11):

$$C_{\text{СУ}} = K(T_{\text{СУ}}) \cdot (P_{\text{СУ}} - P_S(T_{\text{СУ}})), \quad (11)$$

где $P_{\text{СУ}} = P_P - \Delta P_{\text{сопр.}} - \Delta P_{\text{скор.}} + \rho g \Delta H$ – давление в СУ при расхолаживании; $\Delta P_{\text{сопр.}}$ – гидравлическое сопротивление, принятое по прототипу при расходе в режиме ремонтного расхолаживания; ρ – плотность теплоносителя; $\Delta P_{\text{скор.}} = (\rho \cdot (G_P)^2 \cdot \nu^2) / S^2 \cdot 2$ – скоростной напор с учетом сужения струи; ν – кинематическая вязкость теплоносителя; S – площадь поперечного сечения наиболее узкого места СУ; ΔH – превышение уровня теплоносителя первого контура в реакторе над соплом; $T_{\text{СУ}} = T_P$ – температура в СУ в процессе ремонтного расхолаживания.

Равновесная концентрация газа в теплоносителе, проходящим через ТО₁₋₃ (12):

$$C_{\text{ТО1-3}} = K(T_{\text{ТО1-3}}) \cdot (P_{\text{ТО1-3}} - P_S(T_{\text{ТО1-3}})), \quad (12)$$

где $P_{\text{ТО1-3}}$ – давление в ТО₁₋₃ при расхолаживании; $T_{\text{ТО1-3}}$ – температура в ТО₁₋₃ в процессе ремонтного расхолаживания.

Равновесная концентрация газа в теплоносителе на входе в ЦНР (13):

$$C_B = K(T_B) \cdot (P_B - P_S(T_B)), \quad (13)$$

где P_B – давление на входе в ЦНР при расхолаживании; $T_B = T_{\text{ТО1-3}}$ – температура на входе в ЦНР в процессе ремонтного расхолаживания.

Из сравнения равновесных концентраций газа в теплоносителе для различных элементов энергетического оборудования следует, что во всем интервале температур наименьшая равновесная концентрация азота в теплоносителе наблюдается на участке трассы ТО₁₋₃-вход в ЦНР.

Общий объем выделившегося газа при ремонтном расхолаживании определится по формуле (14):

$$V_{\text{г.рем}} = \Delta C_{\text{рем}}, \quad (14)$$

где $\Delta C_{\text{рем}}$ – разность между равновесной концентрацией газа в реакторе и равновесной концентрацией при прохождении элемента с наименьшей равновесной концентрацией азота в теплоносителе.

Объемное газосодержание в теплоносителе на входе в ЦНР (15):

$$x = \frac{V_{\text{г}}}{V_{\text{г}} + V_{\text{в}}}, \quad (15)$$

где $V_{\text{г}}$ – объем газа на входе в насос; $V_{\text{в}}$ – объем воды на входе в насос.

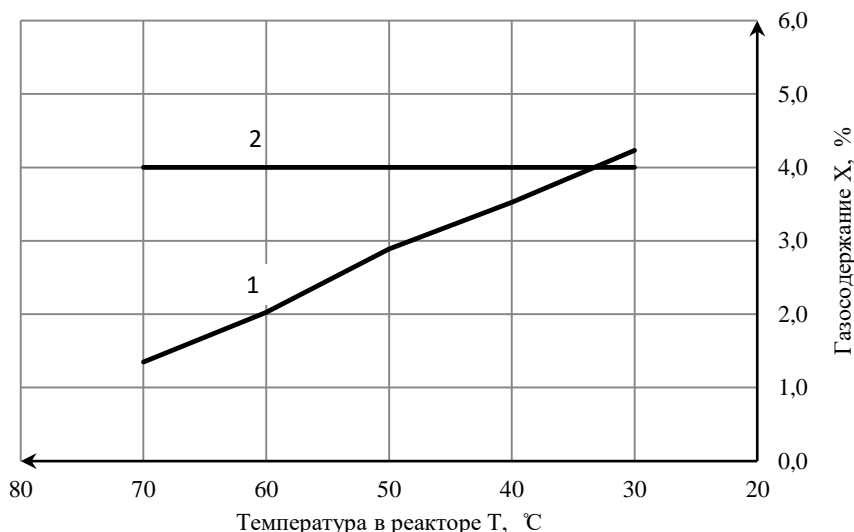


Рис. 9. Зависимость газосодержания на входе в рабочее колесо насоса от температуры в реакторе (1), газосодержание, при котором вероятна кавитация насоса (2)

Из графика следует, что при ремонтном расхолаживании с температурой в реакторе ниже 35 °С возможна кавитация в ЦНР. Для исключения данного явления расхолаживание РУ целесообразно вести поддерживая температуру теплоносителя в реакторе в интервале 40÷70 °С, путем, например, пунктирной работы насоса, снижать гидравлическое сопротивление системы расхолаживания и высотное расположение ЦНР относительно реактора, уменьшать до минимально-возможного расход через ЦНР.

Заключение

При проектировании реакторных установок с ВВР и газовой системой компенсации давления необходимо проводить обстоятельный анализ процессов газопереноса и газовыделения, а также их влияния на надежность работы оборудования первого контура.

Библиографический список

1. Герасимов, В.В. Водный режим атомных электростанций / В.В. Герасимов, А.И. Касперович, О.И. Мартынова. М.: Атомиздат, 1976. – 400 с.
2. Касперович, А.И. Атомная энергия / А.И. Касперович, Н.В. Бычков, В.К. Ширяев, Т. 36, В. 5, 1974. – С. 387-389.
3. Бычков, Н.В. Атомная энергия / Н.В. Бычков, А.И. Касперович, Т. 28, Вып. 4, 1970. – С. 145.
4. Боднар, Ю.Ф. Атомная энергия / Ю.Ф. Боднар, Т. 4, Вып. 5, 1970. – С. 150.
5. Васильев, Н.В. О природе «газового» кризиса кипения / Н.В. Васильев, Ю.А. Зейгарник, К.А. Ходаков, В.М. Федуленко, Т. 53, В. 6, 2015. – С. 881-884.
6. Федуленко, В.М. К истории энергетического реактора РБМК и о «газовом кризисе теплоотдачи» / В.М. Феделенко. – М.: ИАЭ, 2012.
7. Зверев, Д.Л. Атомная энергия / Д.Л. Зверев, А.Н. Пахомов, В.И. Полуничев, К.Б. Вешняков, С.В. Кабин, Т. 113, В. 6, 2012. – С. 323-328.

*Дата поступления
в редакцию: 10.06.2019*

A.F. Filimonov, V.I. Polunichev, A.E. Pomysukhina

**GAS EMISSION AND GAS TRANSFER IN A FIRST COOLANT LOOP EQUIPMENT
OF THE REACTORS WITH GAS PRESSURE COMPENSATION SYSTEM**

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

Purpose: the article presents the process evaluation performed of gas emission and gas transfer in a first coolant loop equipment of the reactors with gas pressure compensation system.

Methodology: the main investigation method is the analysis of the accessible sources of information related to the scope of the study: articles, conferences proceedings, reports.

Results: the processes of nitrogen saturation of the coolant of the primary circuit of the reactor and the pressure compensator water are considered. A quantitative assessment of the volume of gas released from the coolant for different operating modes of the installation is given.

Findings: the results of the analysis confirm the assumptions about the effect of the gas dissolved in the primary coolant carrier on the performance of the cooling pumps. According to the results, a certain framework has been defined in which the installation must be cooled.

Keywords: normal and maintenance cooling of the reactor, gas pressure compensation system, equilibrium gas concentration, gas emission, gas transfer.