

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА ПОВЕРХНОСТНОГО КИПЕНИЯ В АКТИВНЫХ ЗОНАХ ТРАНСПОРТНЫХ РЕАКТОРОВ

В.И. Королев*, И.И. Лощаков**

*Санкт-Петербургская государственная морская академия (СПбГМА)

им. адм. С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург

**Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
(СПбГПУ), г. Санкт-Петербург



Режим теплопередачи в активных зонах реакторов, используемых на отечественных атомных ледоколах «Таймыр», «Ямал», «Арктика», «Россия», «Вайгач» и других, в силу специфики эксплуатации судна, сопровождается пристенным кипением при работе на уровнях мощности более 40–60% номинальной. Относительная длина участков твэлов с поверхностным кипением может составлять 50–80% длины твэла. Пристенное кипение влияет на надежность твэлов (их герметичность), а, следовательно, и активной зоны в целом [1]. В частности, в циркониевых активных зонах пристенное кипение интенсифицирует процесс нодулярной коррозии циркониевых сплавов [2].

Поскольку транспортные активные зоны имеют небольшие размеры, рассмотрим теплопередачу в них в рамках простой модели косинусоидального энерговыделения по длине твэла [3]:

$$q_z = q_z^{\max} \cos \frac{\pi z}{H_{\text{эф}}}, \quad (1)$$

где q_z^{\max} – максимальная линейная плотность теплового потока в центральной части топливной кассеты (ТК); q_z – линейная плотность теплового потока в точке с координатой z ; $H_{\text{эф}}$ – высота активной зоны с учетом эффективной добавки. Предполагается, что начало координат находится в центре активной зоны. В этом случае температуру оболочки твэла в произвольной точке z вдоль ТК можно оценить по формуле:

$$t_{\text{об}}(z) = t_z + \chi \frac{q_z^{\max}}{\alpha_{\text{с-т}} \Pi_{\text{твэл}}} \cos \left(\frac{\pi}{H_{\text{эф}}} z \right), \quad (2)$$

где χ – коэффициент, учитывающий долю энерговыделения в ядерном топливе; t_z – температура теплоносителя в точке z ; $\alpha_{\text{с-т}}$ – коэффициент теплоотдачи от стенки твэла к теплоносителю; $\Pi_{\text{твэл}}$ – периметр твэла.

Введя обозначение $K = \chi \frac{q_z^{\max}}{\alpha_{\text{с-т}} \Pi_{\text{твэл}}}$, выражение (2) можно представить в виде:

$$t_{06}(z) = t_z + K \cos\left(\frac{\pi}{H_{\text{эф}}} z\right). \quad (3)$$

Температура теплоносителя в любой точке твэла с координатой z может быть найдена интегрированием (1):

$$t_z = t_1 + \int_{-\frac{H_{\text{аз}}}{2}}^z \frac{q_z}{\bar{c}_p G} dz, \quad (4)$$

где t_1 – температура теплоносителя на входе в ТК; \bar{c}_p – средняя изобарная теплоемкость теплоносителя в активной зоне; G – расход теплоносителя через ТК. После интегрирования выражения (4), с учетом (1), получим:

$$t_z = t_1 + \frac{q_z^{\text{max}} H_{\text{эф}}}{\bar{c}_p \pi G} \left(\sin \frac{\pi z}{H_{\text{эф}}} + \sin \frac{\pi H_{\text{аз}}}{2 H_{\text{эф}}} \right) = t_1 + \frac{\Delta t_p}{2} \left(1 + \frac{\sin \beta_1 z}{\sin \beta_1 \frac{H_{\text{аз}}}{2}} \right), \quad (5)$$

где $\Delta t_p = (t_2 - t_1)$ – подогрев теплоносителя в активной зоне; t_2 – температура воды на выходе из активной зоны; $\beta_1 = \pi/H_{\text{эф}}$ – осевой геометрический параметр; $H_{\text{аз}}$ – реальная (без эффективной добавки) высота активной зоны.

В транспортных реакторах используется программа регулирования мощности реактора с поддержанием постоянной средней температуры теплоносителя в первом контуре. При этом расход теплоносителя задается работой четырех двухскоростных циркуляционных насосов (ЦНПК), работающих на большой скорости (БС). В соответствии с такой программой регулирования мощности, режим работы ЦНПК не изменяется на частичных нагрузках реакторной установки (РУ), поэтому расход теплоносителя через активную зону остается практически постоянным. Такие особенности реализации программы регулирования мощности Q_p формально можно представить в следующем виде:

$$\bar{t}_1 = 0,5(t_1 + t_2) \approx 295^\circ \text{C} = \text{const}, \quad G = \text{const}, \quad \text{при } \bar{Q}_{p,i} = \text{varia}, \quad (6)$$

где $\bar{Q}_{p,i} = \frac{Q_{p,i}}{Q_{p,0}}$ – относительная мощность РУ на i -ом частичном режиме; $Q_{p,0}$ и $Q_{p,i}$ – соответственно мощности РУ на номинальном и частичном режимах.

Принимая во внимание, что $t_1 = \bar{t}_1 - \Delta t_p / 2$, перепишем выражение (5):

$$t_z = \bar{t}_1 + \frac{\Delta t_p}{2} \left(\frac{\sin \beta_1 z}{\sin \beta_1 \frac{H_{\text{аз}}}{2}} \right). \quad (7)$$

Учитывая, что на номинальном режиме работы РУ подогрев Δt_p теплоносителя в активной зоне составляет 44°C , и подставляя в формулу (7) конкретные размеры транспортных активных зон: $H_{\text{эф}} = 1,12$ м, $H_{\text{аз}} = 0,92$ м, получим выражение для температуры t_z теплоносителя:

$$t_z = 295 + 22,9 \sin(2,8z). \quad (8)$$

Когда температура оболочки $t_{06}(z)$ в формуле (3) превышает температуру насыщения $t_s(p_1)$ при давлении p_1 в первом контуре, начинается пристенное кипение. Зависимость температуры насыщения от давления в диапазоне изменения давления в первом контуре $p_1 \in [12...16]$ МПа можно аппроксимировать линейной функцией:

$$t_s(p_1) = 5,83p_1 + 254,6. \quad (9)$$

Для случая, когда температура оболочки твэла равна температуре насыщения $t_s(p_1)$, можно написать равенство:

$$t_{об}(z) = t_s(p_1) = t_z + K \cos(2,8z) = 295 + 22,9 \sin(2,8z) + K \cos(2,8z). \quad (10)$$

Начало и окончание зоны кипения по высоте твэла можно определить, решив это уравнение, например, относительно $\sin(2,8z)$. Решение уравнения (10), с учетом (9) можно записать в виде:

$$\sin(2,8z_{1,2}) = \frac{22,9(5,83p_1 - 40,4)}{22,9^2 + K^2} \pm \frac{K}{22,9^2 + K^2} \sqrt{-34p_1(p_1 - 13,8) - 1108 + K^2}. \quad (11)$$

Зная действительные корни $\sin(2,8z_1)$ и $\sin(2,8z_2)$, определяем протяженность зоны $l_{нк}(p_1)$ поверхностного кипения на оболочке твэла:

$$l_{нк}(p_1) = z_2 - z_1. \quad (12)$$

Представляет интерес условие, при котором поверхностное кипение отсутствует. В этом случае длина зоны $l_{нк}(p_1)$ поверхностного кипения равна нулю. Это возможно, если подкоренное выражение в формуле (11) будет равно нулю, т.е.

$$-34p_1(p_1 - 13,8) - 1108 + K^2 = 0. \quad (13)$$

Практический смысл имеет только положительный корень этого уравнения:

$$p_1 = 6,9 + \sqrt{0,029K^2 + 15}. \quad (14)$$

Координата $z_{гп}$ твэла, где при прекращении поверхностного кипения температура максимальна, определяется следующим образом:

$$z_{гп} = \frac{1}{2,8} \arcsin \left[\frac{22,9(5,83p_1 - 40,4)}{22,9^2 + K^2} \right] \text{ или} \\ z_{гп} = \frac{1}{2,8} \arcsin \left\{ \frac{22,9 \left[40,2 + 5,83\sqrt{0,029K^2 + 15} - 40,4 \right]}{22,9^2 + K^2} \right\}. \quad (15)$$

Протяженность зоны пристенного (поверхностного) кипения (ЗПК) в зависимости от давления в первом контуре показана на рис. 1. Протяженность зоны поверхностного кипения возрастает при уменьшении давления в первом контуре и увеличении значения величины K . При давлении 12 МПа и $K = 50$ поверхностное кипение занимает до 70% длины твэла. По мере роста давления в первом контуре протяженность зоны пристенного кипения уменьшается и затем вообще исчезает. Чем больше перепад температур (K) между теплоносителем и стенкой твэла, тем при большем давлении исчезает зона пристенного кипения.

Можно найти такое сочетание параметров q_z^{\max} , $\alpha_{с-т}$, p_1 , при котором поверхностного кипения не будет, или зона кипения займет определенную часть длины твэла. Например, если имеет место соотношение $t_{об}(z) \geq t_s(p_1)$, температуру оболочки в зоне пристенного кипения теплоносителя можно определить с помощью эмпирической формулы из [4]:

$$t'_{об}(z) = t_s(p_1) + [41 - 0,105t_s(p_1)] \left[1,163q_z^{\max} \Pi_{твэл} \cos(2,8z) \right]^{0,3}. \quad (16)$$

На частичных режимах работы РУ температуру оболочки твэла при $t_s(p_1) > t_{об}(z)$ можно найти по формуле:

$$t_{об,i}(z, \bar{Q}_{p,i}) = 295 + \bar{Q}_{p,i} [22,9 \sin(2,8z) + K \cos(2,8z)]. \quad (17)$$

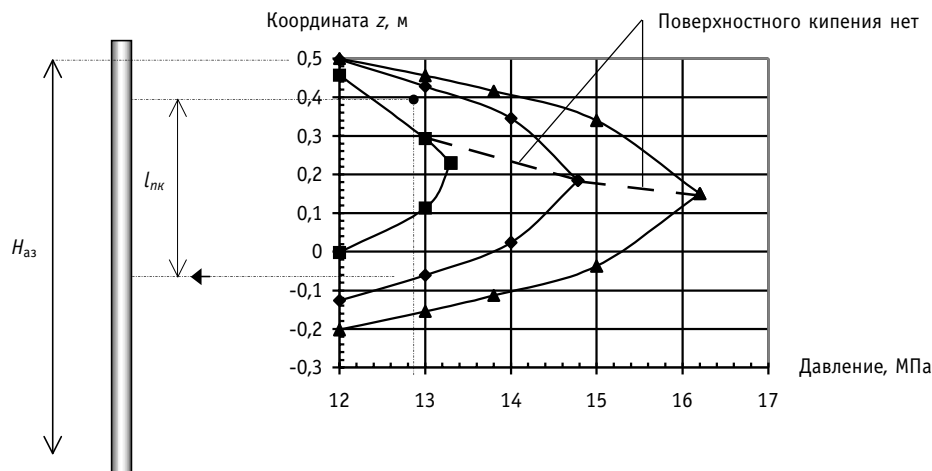


Рис. 1. Изменение протяженности зоны $l_{лк}(p_1)$ пристенного кипения теплоносителя первого контура в зависимости от величины коэффициента K и давления: ■ $K = 30$; ◆ $K = 40$; ▲ $K = 50$

Изменение температуры оболочки в зависимости от координаты z твэла при различных давлениях в первом контуре и коэффициенте $K = 37,6$ показано на рис. 2. При прочих равных условиях максимальная температура оболочки снижается с уменьшением давления в первом контуре. Например, при снижении давления с 14 до 12 МПа максимальная температура оболочки уменьшается примерно на 12°C . Анализ показал, что для рассматриваемого варианта активной зоны характерны следующие особенности при работе на номинальной мощности:

- протяженность зоны поверхностного кипения увеличивается с уменьшением давления теплоносителя;
- при давлении более 14,4 МПа поверхностное кипение прекращается;
- при увеличении давления теплоносителя от 12 до 14,4 МПа температура оболочки возрастает примерно на 12°C ; такое колебание температуры равносильно изменению мощности $\sim 25\%$ от номинальной;

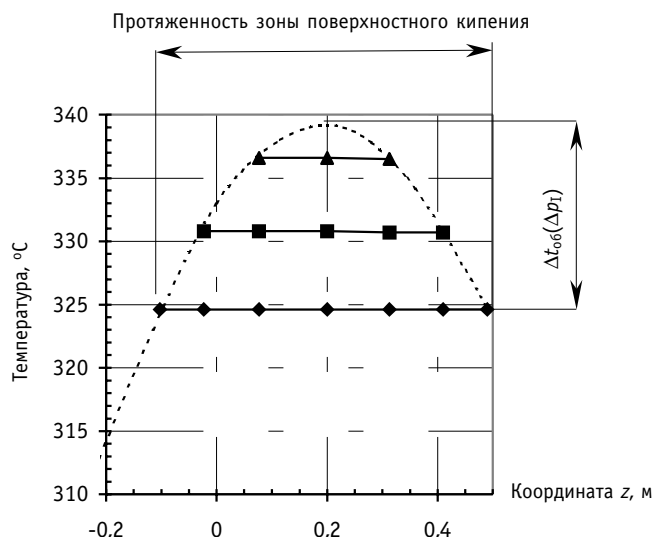


Рис. 2. Изменение максимальной температуры оболочки твэла в зависимости от координаты z и давления в первом контуре: ◆ 12 МПа; ■ 13 МПа; ▲ 14 МПа; пунктирная кривая показывает изменение температуры оболочки твэла для случая, когда пристенное кипение отсутствует

• темп изменения температуры оболочки в зависимости от изменения давления в первом контуре $\left(\frac{\partial t_{об}}{\partial p_I}\right)_{Q_p=\text{const}}$, составляет около 6 град/МПа.

Приравняв производную выражения (17) к нулю, получим координату z^{\max} , соответствующую максимуму температуры оболочки:

$$z^{\max} = \frac{1}{2,8} \arcsin \left[\sqrt{\frac{524,4}{K^2 + 524,4}} \right]. \quad (18)$$

Оценим максимально возможную температуру оболочки в зависимости от мощности $\bar{Q}_{p,i}$ реактора, подставив (18) в (17)

$$t_{об,i}^{\max}(\bar{Q}_{p,i}) = 295 + \bar{Q}_{p,i} \left(22,9 \sqrt{\frac{524,4}{K^2 + 524,4}} + K \sqrt{1 - \frac{524,4}{K^2 + 524,4}} \right). \quad (19)$$

Поскольку температура оболочки зависит от трех параметров: давления (при наличии пристенного кипения), значения величины K и мощности, ее удобно представить в виде двух графиков (номограммы). Номограмма для оценки максимальной температуры оболочки твэла, которая построена с использованием формул (19) и (16) приводится на рис. 3. В правом квадранте пунктирная линия соответствует температуре воды, а сплошная – оболочке твэла.

В соответствии с номограммой, если в первом контуре давление $p_I = 13,4$ МПа, то в диапазоне мощностей 70–100% от номинальной, ($K = 50$) максимальная температура оболочки твэла не меняется ввиду того, что здесь находится зона поверхностного кипения теплоносителя. Величина максимальной температуры в рассмотренном диапазоне мощностей равна $\approx 335^\circ\text{C}$. Если мощность реактора меньше 70% номинальной, максимальная температура оболочки монотонно уменьшается по мере снижения мощности РУ, в соответствии с кривой (левый квадрант).

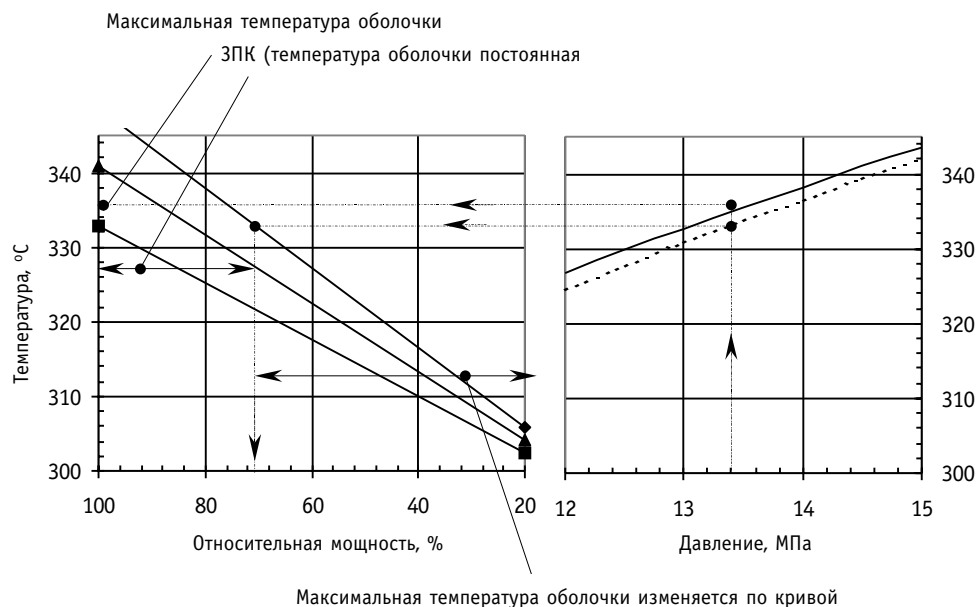


Рис. 3. Схема определения максимальной температуры оболочки твэла с использованием номограммы:

■ $K = 30$; ▲ $K = 40$; ◆ $K = 50$

При увеличении давления в первом контуре диапазон мощностей, при которых максимальная температура постоянна, сужается. При $p_1 = 14,5$ МПа (по сплошной линии) максимальная температура оболочки твэла, в зависимости от относительной мощности, определяется только кривой в левом квадранте ($K = 40$). Если давление снижается, то диапазон мощностей, в котором максимальная температура оболочки твэла не меняется, возрастает. Так при $p_1 = 12,0$ МПа максимальная температура оболочки равна 327°C , а диапазон мощностей, в котором она не меняется, составляет 68–100% от номинальной мощности (при $K = 37,6$).

Характерной особенностью системы газовой компенсации давления первого контура транспортных реакторов является некоторое увеличение давления при снижении мощности реактора и наоборот, т.е. $\frac{\partial p_1}{\partial Q_p} < 0$. Оценка изменения величины давления в первом контуре при изменении мощности производилась в [5] и было показано, что ее можно представить в виде:

$$\frac{\partial p_1}{\partial Q_p} = -0,3 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{\text{МПа}}{\%}. \quad (20)$$

Рассмотрим диапазон мощностей, где соблюдается пропорциональность между мощностью реактора и максимальной температурой оболочки (см. рис. 3). Температуру оболочки определим для двух мощностей реактора $\bar{Q}_{p,1}$ и $\bar{Q}_{p,2}$, используя формулу (17). Различие между температурами оболочки в таком случае равно:

$$\Delta t'_{об} = t_{об2}(z, \bar{Q}_{p,2}) - t_{об1}(z, \bar{Q}_{p,1}) = (\bar{Q}_{p,2} - \bar{Q}_{p,1}) [22,9 \sin(2,8z) + K \cos(2,8z)], \quad (21)$$

причем, наибольшее значение этой разности составит

$$\Delta t_{об}^{\max} = (\bar{Q}_{p,2} - \bar{Q}_{p,1}) \left(22,9 \sqrt{\frac{524,4}{K^2 + 524,4}} + K \sqrt{1 - \frac{524,4}{K^2 + 524,4}} \right). \quad (22)$$

В частности, при давлении в первом контуре 14,5 МПа ($K \leq 40$), когда во всем диапазоне мощностей соблюдается пропорциональность между максимальной температурой оболочки и мощностью реактора, темп изменения температуры в зависимости от изменения мощности

$$\frac{\partial t_{об}^{\max}}{\partial Q_p} \approx \left(22,9 \sqrt{\frac{524,4}{K^2 + 524,4}} + K \sqrt{1 - \frac{524,4}{K^2 + 524,4}} \right) 10^{-2}, \frac{^\circ\text{C}}{\%}. \quad (23)$$

В диапазоне мощностей, где пропорциональность между относительной мощностью реактора и максимальной температурой оболочки не имеет места, температура оболочки не зависит от мощности реактора, а зависит только от давления. Из рис. 3 (правый квадрант) видно, что максимальная температура оболочки, при росте давления от 12 до 15 МПа, увеличивается от 327 до 344°C . Это позволяет сделать оценку темпа изменения температуры оболочки в зависимости от изменения давления

$$\frac{\partial t_{об}^{\max}}{\partial p_1} \approx \frac{342 - 325}{15 - 12} \approx 5,7 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{МПа}. \quad (24)$$

Принципиальный интерес имеют следующие четыре варианта маневра.

1. Мощность изменяется в пределах зоны пропорциональности между максимальной температурой оболочки и мощностью реактора, т.е.

$$(\bar{Q}_{p,(i-1)} + \Delta \bar{Q}_{p,i}) \leq \bar{Q}_p^*(p_1), \quad (25)$$

где $\bar{Q}_{p,(i-1)}$ – мощность реактора до маневра; $\Delta \bar{Q}_{p,i}$ – величина изменения мощности в

результате маневра; $\bar{Q}_p^*(p_1)$ – граничная мощность, выше которой пропорциональность между максимальной температурой оболочки и мощностью нарушается (температура не зависит от мощности). Зависимость величины $\bar{Q}_p^*(p_1)$ от давления можно представить в виде следующего линейного выражения:

$$\bar{Q}_p^*(p_1) = \frac{583p_1 - 4040}{22,9\sqrt{\frac{524,4}{K^2 + 524,4}} + K\sqrt{1 - \frac{524,4}{K^2 + 524,4}}}, \% \quad (26)$$

Изменение температуры оболочки, при изменении мощности на величину $\Delta \bar{Q}_{p,i}$, % можно оценить по формуле:

$$\Delta t_{об}(\Delta \bar{Q}_{p,i}) = \frac{\partial t_{об}^{max}}{\partial \bar{Q}_p} \Delta \bar{Q}_{p,i} \approx \left(22,9\sqrt{\frac{524,4}{K^2 + 524,4}} + K\sqrt{1 - \frac{524,4}{K^2 + 524,4}} \right) 10^{-2} \Delta \bar{Q}_{p,i} \quad (27)$$

2. Мощность изменяется в пределах диапазона, где температура оболочки не зависит от мощности, но зависит от давления в первом контуре

$$\bar{Q}_p^*(p_1) < (\bar{Q}_{p,(i-1)} \pm \Delta \bar{Q}_{p,i}) \leq \bar{Q}_{p,0}, \quad (28)$$

где $\bar{Q}_{p,0}$ – относительная номинальная мощность реактора.

В этом случае маневр влияет на максимальную температуру оболочки вследствие изменения давления в первом контуре

$$\Delta t_{об}(\Delta \bar{Q}_{p,i}) = \frac{\partial t_{об}^{max}}{\partial p_1} \left(-\frac{\partial p_1}{\partial \bar{Q}_p} \right) \Delta \bar{Q}_{p,i} \approx 5,7(-0,3 \cdot 10^{-2}) \Delta \bar{Q}_{p,i} \approx -1,7 \cdot 10^{-2} \Delta \bar{Q}_{p,i}. \quad (29)$$

3. Исходная мощность $\bar{Q}_{p,(i-1)}$ находится в зоне пропорциональности, но в результате увеличения мощности на величину $\Delta \bar{Q}_{p,i}$ мощность становится больше граничной $\bar{Q}_p^*(p_1)$; в этом случае изменение температуры оболочки можно оценить по формуле

$$\Delta t_{об}(\Delta \bar{Q}_{p,i}) = (1-\beta) \frac{\partial t_{об}^{max}}{\partial \bar{Q}_p} \Delta \bar{Q}_{p,i} + \beta \frac{\partial t_{об}^{max}}{\partial p_1} \left(-\frac{\partial p_1}{\partial \bar{Q}_p} \right) \Delta \bar{Q}_{p,i} \quad \text{или} \quad (30)$$

$$\Delta t_{об}(\Delta \bar{Q}_{p,i}) \approx (1-\beta)(0,8 \cdot 10^{-2} K + 0,137) \Delta \bar{Q}_{p,i} + \beta(-1,7 \cdot 10^{-2}) \Delta \bar{Q}_{p,i},$$

где коэффициент β равен

$$\beta = \frac{\bar{Q}_{p,(i-1)} + \Delta \bar{Q}_{p,i} - \bar{Q}_p^*(p_1)}{\Delta \bar{Q}_{p,i}}. \quad (31)$$

4. Мощность до маневра реактора $\bar{Q}_{p,(i-1)}$ находится в диапазоне, где максимальная температура зависит от давления в первом контуре:

$$\bar{Q}_p^*(p_1) < \bar{Q}_{p,(i-1)} \leq \bar{Q}_{p,0}. \quad (32)$$

В результате снижения мощности на величину $\Delta \bar{Q}_{p,i}$, мощность вышла из этого диапазона, т.е.

$$(\bar{Q}_{p,(i-1)} - \Delta \bar{Q}_{p,i}) \leq \bar{Q}_p^*(p_1). \quad (33)$$

В таком случае изменение максимальной температуры оболочки можно определить следующим образом:

$$\Delta t_{об}(\Delta \bar{Q}_{p,i}) = (1 - \beta^*) \frac{\partial t_{об}^{max}}{\partial \bar{Q}_p} (-\Delta \bar{Q}_{p,i}) + \beta^* \frac{\partial t_{об}^{max}}{\partial p_1} \left(-\frac{\partial p_1}{\partial \bar{Q}_p} \right) (-\Delta \bar{Q}_{p,i}), \quad (34)$$

где $\beta^* = \frac{\bar{Q}_{p,(i-1)} - Q_p^*(p_1)}{\Delta \bar{Q}_{p,i}}$.

В заключение отметим следующее:

- принципиально можно выделить два основных поддиапазона изменения мощности реактора: *первый*, где наблюдается пропорциональность между мощностью и максимальной температурой оболочки и *второй*, где максимальная температура оболочки зависит непосредственно от давления в первом контуре;
- при маневрировании в нижней части диапазона мощностей (первый поддиапазон), изменение температуры оболочки пропорционально мощности (27);
- при маневрировании в верхней части диапазона (второй поддиапазон) изменение температуры оболочки будет зависеть только от изменения давления в первом контуре и крутизны характеристики (20) газовой системы компенсации давления (29);
- если маневр производится на стыке двух поддиапазонов, оценивается доля изменения в первом и втором поддиапазонах (b) и изменение максимальной температуры оболочки определяется по формулам (30) и (34);
- получены простые аналитические соотношения для оценки протяженности зоны поверхностного кипения и влияние на нее теплотехнических и конструктивных параметров активной зоны;
- предложена номограмма для оценки влияния режимных показателей эксплуатации РУ на максимальную температуру оболочек твэлов;
- знание температуры оболочки твэла, при различных режимах эксплуатации активной зоны, позволяет более эффективно использовать топливо за счет уменьшения вероятности разгерметизации оболочки твэла, что, при прочих равных условиях, позволит увеличить энерговыработку активной зоны.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования Российской Федерации. Грант «Исследование теплообмена в активной зоне реактора ВВЭР энергоблока АЭС при изменении производительности ГЦН».

Литература

1. *Королев В.И.* Основы управления судовыми реакторными установками при работе на мощности: Учебн. пособие. – СПб.: Медицинская пресса, 2003. – 106 с.
2. *Герасимов В.В.* Коррозия реакторных материалов. – М.: Атомиздат, 1980.
3. *Дементьев Б.А.* Ядерные энергетические реакторы: Учебник для вузов – М.: Энергоиздат, 1984. – 280 с.
4. *Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П.* Справочник по теплогидравлическим расчетам. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 296 с.
5. *Королев В.И.* Практические задачи по дисциплине «Судовые ядерные энергетические установки»: Учебн. пособие. Ч.1. Оценочные расчеты по системам ЯППУ. – С.-Пб.: ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2001. – 92 с.

Поступила в редакцию 26.03.2004

cal computation of velocity and temperature fields of a coolant in the different cross sections throughout a model assembly height are presented.

УДК 621.039.51

The Study of the Mode of the Surface Boiling in Transport Active Zone \ V.I. Korolev, I.I. Loshchakov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 8 pages, 3 illustrations. – References, 5 titles.

The heat transfer in the active zone of transport reactor of the atomic icebreaker was investigated. The functions of the temperature change of the bare fuel shell depending on the heat power of the reactor were obtained at the time of performing maneuver by power of the ship energy installation.

УДК 532.58

Vibrations of Hydrodynamically Coupled Systems/ V.S.Fedotovskiy, T.N.Verestchagina; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 9 pages, 7 illustrations. – References, 7 titles.

One-dimension vibrations of a body with hole filled by liquid and another body are considered as an example of hydrodynamically coupled systems. Correlations of added mass matrix elements are obtained. The analysis of natural frequencies and forced amplitudes is developed. The parameters of system when the unlimited resonant oscillations are occurring in spite of liquid viscous are obtained. The experimental data of “tube in tube” hydrodynamically coupled vibrations are presented.

УДК 621.039.53: 621.311.25

Investigation of Single-Circuit NPP Turbomachine Rotor Stability. On the Possibility of Quadratic Nonlinearity Substitution by Cubic One for the System of Electromagnetic Rotor Suspension \ V.S. Vostokov, A.V. Khodykin; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 4 pages. – References, 7 titles.

Asymptotic stability of electromagnetic suspension non-linear system without bias currents is proven by Lyapunov method. The admissibility of quadratic non-linearity substitution by cubic one is proven from the point of view of zero equilibrium state stability.

УДК 621.039: 621.311.25

The Cooperations of “ROSENERGOATOM” and Ural State Technical University in the Area of Personnel Training for Servicing and Equipment Maintenance with Reference to Nuclear Power Plants \ S.E. Sheklein, O.L. Tashlikov, V.I. Velkin, A.G. Shastin, V.N. Dementev, N.I. Markelov, Yu. I. Sorokin; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 9 pages, 6 illustrations. – References, 4 titles.

Analyses of repairing downtime durations for different types of nuclear power plant's (NPP) power units as well as the forecasting of maintenance personnel up to year 2010 is carried out. The necessity of capacity factor growth due to reducing of the repairing downtime by means of repairing period's optimization and elimination of the off-scheduled stopping associated with low quality repairs is shown. The classification of NPP personnel violations, the ways to illuminate such violations including improvements in training of the personnel for servicing and equipment maintenance (SEM) at the institutions of higher education are considered. The experience in organization of the training of personnel for SEM in Ural State Technical University and the role of the training complex at “Nuclear power” sub-faculty in improving the training of personnel with higher education are considered.

УДК 621.039.534: 536.4

The Temperature Effect upon the Oxide Layer Growth Rate which Forms during Oxidation in the Eutectic Pb-Bi Alloy Stream \ Yu. V. Shumov, I.N. Gorelov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 11 pages, 2 tables, 2 illustrations. – References, 8 titles.

The results of X-ray examination of the model tube surface, made of the 16C12Cr2MoWSiNbVB ferritic-martensitic steel, after model lengthy testing in the stream of eutectic Pb-Bi alloy with temperature drop in from 300°C to 600°C on the length of 600 mm, are presented. Before testing the model tube did not have oxide film on the surface. X-ray researches were carried out in the surface