

## МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РАСЧЕТОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ТОПЛИВА В ТВЭЛАХ ТВС РЕАКТОРА БН-600

**С.В. Богатов, М.Г. Киреев**

*Белоярская АЭС, г. Заречный*



Статья содержит методику определения максимальной температуры топлива и расчетные исследования температурного режима топлива в ТВЭлах ТВС различного типа при эксплуатации в реакторе БН-600. Рассмотрено влияние ураната натрия в зазоре между топливом и оболочкой ТВЭла на процессы теплопередачи.

**Ключевые слова:** коэффициент теплопередачи, оболочка ТВЭла, температурный режим, теплообмен, уранат натрия.

**Key words:** heat-transfer coefficient, cladding of the fuel pin, temperature behaviour, heat exchange, sodium uranate.

Определение максимальной температуры топлива, распределение температуры по сечению топлива являются важнейшими задачами при эксплуатации ТВС (особенно экспериментальных), что возможно осуществлять только расчетными методами. Следует также отметить, что безопасность эксплуатации ЯЭУ определяется и запасом до температуры плавления топливной композиции твэлов ТВС.

С другой стороны, работоспособность оболочек твэлов ТВС и их ресурс определяются в значительной степени следующими факторами: распределением агрессивных продуктов деления топлива (I, Te, Cs) в зазоре топливо-оболочка, состоянием газового зазора. Действие этих факторов способствует коррозированию оболочки со стороны топлива и определяется (в значительной степени) температурными условиями эксплуатации элементов твэлов ТВС.

Для определения температуры топлива необходимо уметь рассчитывать подогрев теплоносителя, а также коэффициенты теплоотдачи от теплоносителя к оболочке ( $\alpha$ ), теплопроводности оболочки ( $\lambda_{об}$ ), теплопередачи через зазор топливо-оболочка ( $\alpha_3$ ) и теплопроводности топлива ( $\lambda_T$ ) для каждого ТВЭла в произвольном сечении по высоте активной части ТВС. Наибольшую неопределенность имеет величина коэффициента теплопередачи через газовый зазор в ТВЭле. Эта неопределенность связана с существенным технологическим допуском на размеры топливных втулок, а также на величину внутреннего диаметра оболочки ТВЭла, с возможным перекосом этих втулок при наборе топливного столба и т.д.

Другим источником неопределенности коэффициента теплопередачи через газовый зазор является сложный характер процессов газоразделения из топлива и

перераспределения газообразных продуктов деления под воздействием облучения, а также радиационного формоизменения топлива и оболочки. Все это значительно затрудняет оценку величины  $\Delta z$  расчетным путем.

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Теплообмен между оболочкой твэла ТВС и топливом обуславливается теплопроводностью газового зазора, тепловым излучением и теплообменом через пятна непосредственного контакта топлива с оболочкой.

1. В качестве базовой модели для определения величины зазора между топливом и оболочкой для твэлов ТВС быстрых реакторов используется модель Огумы [1]. С учетом выгорания топлива в твэле зависимость имеет вид

$$G(B) = 0,59 \cdot C \cdot \exp(-0,039 \cdot A) + 0,41 \cdot C \cdot \exp(-(0,0039 \cdot A + 0,95 \cdot B)) \text{ мкм}, \quad (1)$$

где  $A = q_l - 60$ ,  $q_l$ , Вт/см – удельная линейная нагрузка на твэл ТВС;

$B$ , МВт·сут/кг – выгорание топлива;

$C = G_0 - (\Delta d + K) - (\Delta d_f - \Delta d_{o6})$ , здесь  $G_0$ , мкм – начальный диаметральный зазор;

$\Delta d = 3,6 \cdot d$ , мкм – величина «прыжка» таблетки топлива;  $d$ , мм – диаметр таблетки;

$\Delta d_f = d_f \cdot \alpha_f \cdot (\bar{t}_f - t_0)$ , мкм – термическое расширение топлива;

$\Delta d_{o6} = d_{o6} \cdot \alpha_{o6} \cdot (\bar{t}_{o6} - t_0)$ , мкм – термическое расширение оболочки, где  $\alpha_f$ ,  $\alpha_{o6}$ , 1/град – средние коэффициенты температурного расширения топлива и оболочки;

$\bar{t}_f$ ,  $\bar{t}_{o6}$ , °C – средние температуры топлива и оболочки;  $t_0$ , °C – температура среды, при которой производится измерение геометрии твэлов ТВС;  $K = K_1 + K_2$  – изменение газового зазора, обусловленное распуханием таблетки топлива и оболочки твэла, где  $K_1$ ,  $K_2$ , мкм – изменение диаметров таблетки топлива и оболочки твэла соответственно.

Экспериментальная оценка величины распухания топлива для твэлов ТВС реактора БН-600 составляет ~1%  $\Delta V/V$  на 1% выгорания топлива. Таким образом, изменение диаметра таблетки топлива составляет

$$K_1 = \frac{1}{29,1} \cdot \beta, \text{ мкм}, \quad (2)$$

где  $\beta$ , МВт·сут/кг – максимальное выгорание топлива в твэле.

Величина распухания диаметра оболочек твэлов ТВС ( $K_2$ ) определяется путем статистического анализа данных измерения геометрии твэлов в «горячей камере» блока №3 Белоярской АЭС.

2. Коэффициент теплопередачи (термической проводимости) межконтактной среды зазора определяется с учетом коэффициента тепловой аккомодации, характеризующего эффективность энергообмена газовых молекул с твердой стенкой, длин температурных скачков на границах зазора [2], а также теплового излучения от топлива к оболочке [3].

Коэффициент тепловой аккомодации определяется по формуле

$$\xi_T = 1 - (1 - \xi_0) \cdot \exp\left[-\frac{E_0}{K \cdot T}\right], \quad (3)$$

где  $E_0$ , Дж – пороговая энергия;  $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$ , Дж/К – постоянная Больцмана;

$T$ , К – абсолютная температура газа;  $\xi_0 = \frac{\mu}{2 \cdot (1 + \mu)}$ , здесь  $\mu = m/M$  – отношение масс атомов газа и стенки.

Длина свободного пробега молекул газа, находящегося в зазоре между топливом и оболочкой твэла, определяется по выражению

$$\bar{l} = \frac{K \cdot T}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot P}, \text{ м}, \quad (4)$$

где  $D$ , м – диаметр молекулы газа (для гелия  $2,44 \cdot 10^{-10}$  м; для ксенона  $4,36 \cdot 10^{-10}$  м, для криптона  $3,96 \cdot 10^{-10}$  м);  $P$ , Па – давление газа под оболочкой (по данным измерений в «горячей камере», для ТВС, эксплуатировавшихся в активной зоне три микрокампании, давление газа составляет  $\sim 1,5 \cdot 10^6$  Па в холодном состоянии).

Длина температурных скачков на границах зазора равна

$$g = \frac{2 - \xi_L}{2 \cdot \xi_T} \cdot \bar{l}, \text{ м}. \quad (5)$$

С учетом вышеизложенного, коэффициент теплопередачи межконтактной среды определяется следующим образом:

$$\alpha_c = \frac{\lambda_c}{G/2 + g_1 + g_2} + 4 \cdot \epsilon_{np} \cdot \sigma \cdot T^3, \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}, \quad (6)$$

где  $\lambda_c$ , Вт/м $^\circ\text{C}$  – коэффициент теплопроводности газа;  $g_1$ ,  $g_2$ , м – длины температурных скачков на границах газовый зазор-стенка;  $\epsilon_{np} = \frac{1}{1/\epsilon_f + 1/\epsilon_{об} - 1}$  – приведенная степень черноты;  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/м $^2 \cdot \text{K}^4$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $T = (T_f + T_{об})/2$ , К – средняя абсолютная температура газа в зазоре, где  $T_f$ ,  $T_{об}$  – абсолютные температуры топлива и оболочки твэла.

3. Коэффициент теплопередачи пятен непосредственного контакта топлива и оболочки (при  $G \leq 0$ ) зависит от степени обработки поверхностей теплообмена и определяется следующим образом [2]:

$$\alpha_n = \frac{\lambda_T}{a_0} \cdot \left( \frac{P_\alpha \cdot a_0}{E \cdot \bar{h}} \right)^\omega, \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}, \quad (7)$$

где  $\lambda_T = \frac{2 \cdot \lambda_f \cdot \lambda_{об}}{\lambda_f + \lambda_{об}}$ , Вт/м $^\circ\text{C}$  – эффективный коэффициент теплопроводности;

$\frac{1}{E} = \frac{1 - \nu_f^2}{E_f} + \frac{1 - \nu_{об}^2}{E_{об}}$ , 1/Па – эффективный модуль упругости;  $\nu_f$ ,  $\nu_{об}$  – значение коэффициента Пуассона для материала топлива и оболочки соответственно;

$\bar{h} = \bar{h}_f + \bar{h}_{об}$ , м – суммарная высота микронеровностей, определяемая по профилограммам поверхностей топлива и оболочки;

$h_i = h_{\mu_i} / (1 + m_i)$ , здесь  $h_{\mu_i}$  – максимальная высота микронеровностей, определяемая классом чистоты поверхности;  $m$  – показатель распределения неровностей

по высоте;  $P_\alpha = \frac{\frac{|G| \cdot 1000}{R} + \frac{P}{E_f} \frac{2R_0^2}{R^2 - R_0^2} + \frac{P_b}{E_{об}} \left( \frac{R}{\delta} - \frac{\nu_{об}}{2} \right)}{\frac{1}{E_f} \left( \frac{R^2 + R_0^2}{R^2 - R_0^2} - \nu_f \right) + \frac{1}{E_{об}} \left( \frac{R}{\delta} - \frac{\nu_{об}}{2} \right)}$ , Па – контактное давление [4],

где  $R$ , мм – радиус границы между топливом и оболочкой;  $R_0$ , мм – радиус центрального отверстия;  $P_b$ , Па – давление теплоносителя на заданной высоте твэла;  $\delta$ , мм – толщина оболочки;  $E_f$ ,  $E_{об}$  – модуль Юнга для материала топлива и оболочки соответственно;  $a_0 = \sqrt{r \cdot \bar{h}}$ , м – предельный радиус пятен контакта, где  $r$ , м – средний радиус кривизны вершин микронеровностей;  $\omega = (2m + 1)/(2m + 3)$ , здесь  $m = m_f + m_{об}$ .

4. Результирующий коэффициент теплопередачи зазора (термической проводимости) можно представить в виде суммы:

$$\alpha_3 = \alpha_c + \alpha_n. \quad (8)$$

В зависимости от величины газового зазора между топливом и оболочкой ТВЭЛ определяющую роль играет тот или иной механизм переноса тепла.

5. Перепад температур на зазоре, таким образом, можно определить как

$$\Delta t_{\text{зз}} = \frac{q_s}{\alpha_3}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (9)$$

где  $q_s$ , Вт/м<sup>2</sup> – удельная нагрузка на наружной поверхности топливного сердечника.

6. Максимальная температура топливного сердечника определяется по формуле теплопроводности цилиндрической стенки [3]

$$t_f^{\text{max}} = t_f + \frac{q_v \cdot r_{\text{отв}}^2}{4 \cdot \lambda_f} \cdot \left[ \left( \frac{r_f}{r_{\text{отв}}} \right)^2 - 2 \cdot \ln \frac{r_f}{r_{\text{отв}}} - 1 \right], \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (10)$$

где  $t_f$ ,  $^\circ\text{C}$  – температура наружной поверхности топлива;  $q_v$ , Вт/м<sup>3</sup> – объемное энерговыделение;  $\lambda_f$ , Вт/м· $^\circ\text{C}$  – коэффициент теплопроводности топлива;  $r_f$ ,  $r_{\text{отв}}$ , м – наружный и внутренний радиусы топливного сердечника.

При отсутствии в центре топливного сердечника отверстия (или его заплавлении) температура определяется так [2]:

$$t_f^{\text{max}} = t_f + \frac{q_v \cdot r_f^2}{4 \cdot \lambda_f}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (11)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РАСЧЕТОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ТОПЛИВА

В соответствии с программой послереакторных исследований ТВС быстрого реактора БН600 с МОХ-топливом были проведены расчеты условий эксплуатации трех ТВС с различным составом топливной композиции (штатная ТВС с таблеточным урановым топливом, экспериментальная ТВС с таблеточным МОХ-топливом и экспериментальная ТВС с виброуплотненным МОХ-топливом), эксплуатировавшихся в активной зоне реактора в одно время. Для каждой из этих сборок были определены ТВЭЛы, имеющие максимальную температуру оболочки за все время эксплуатации, для которых проводился расчет температуры топлива.

Исходные физические данные для определения температуры топлива ТВЭЛов ТВС были взяты из расчетных данных комплекса программ ГЕФЕСТ.

На рис. 1–3 представлены результаты расчетов максимальной температуры внутренней поверхности оболочки ТВЭЛ (а), температуры на наружной поверхности топливного столба (б) и максимальной температуры топлива (в) ТВЭЛов соответствующих ТВС при величине диаметрального зазора между оболочкой ТВЭЛ и топливом, рассчитанной по модели Огумы. Следует отметить, что для ТВС с виброуплотненным МОХ-топливом начальный газовый зазор отсутствует конструктивно.

Поскольку максимальная температура оболочки ТВЭЛов, определенная по программе MIF2 с учетом фактических режимных параметров реакторной установки, всех ТВС достигается на начальном этапе эксплуатации сборок в активной зоне реактора БН-600, на величину газового зазора не оказывает влияние выгорание топлива.

В результате проведенных расчетов получено, что максимальная температура на наружной поверхности топливного сердечника по высоте активной части ТВС

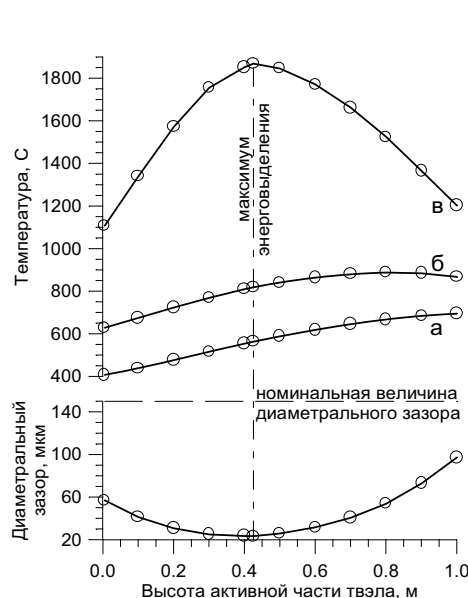


Рис. 1. Распределение диаметра зазора между топливом и оболочкой и температуры оболочки и топлива по высоте активной части ТВЭЛ с таблеточным урановым топливом

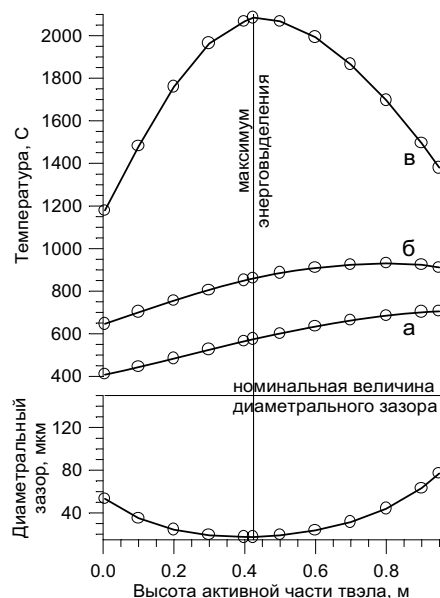


Рис. 2. Распределение диаметра зазора между топливом и оболочкой и температуры оболочки и топлива по высоте активной части ТВЭЛ с таблеточным MOX-топливом

с таблеточным урановым топливом достигается на отметке ~800 мм и составляет ~890°C, а в центре топливного сердечника – в сечении максимума энерговыделения и составляет ~1870°C. Для ТВС с таблеточным MOX-топливом эти температуры достигаются на тех же высотах и составляют ~930 и ~2090°C соответственно.

Максимальная температура топлива ТВС с MOX-топливом выше, чем для ТВС с урановым топливом, т.к. у нее выше удельная линейная нагрузка на рассматриваемый ТВЭЛ  $q_l$  (~48,5 кВт/м против ~43 кВт/м) и ниже коэффициент теплопроводности топливной композиции  $\lambda_f$  (~2,4 Вт/м·°C [4] против ~2,5 Вт/м·°C [5]) при принятой пористости топлива 4%.

Для ТВС с виброуплотненным MOX-топливом ( $q_l \approx 46$  кВт/м, а  $\lambda_f \approx 2$  Вт/м·°C [4] при пористости 10%) максимальная температура на наружной поверхности топливного сердечника по высоте активной зоны достигается на выходе из активной зоны и составляет величину ~800°C, а в центре топливного сердечника – в сечении максимума энерговыделения и составляет ~2460°C при отсутствии центрального отверстия. Центральное отверстие в топливном столбе может образоваться в процессе эксплуатации, тогда при его величине ~1,5 мм максимальная температура в центре топлива составит ~2110°C.

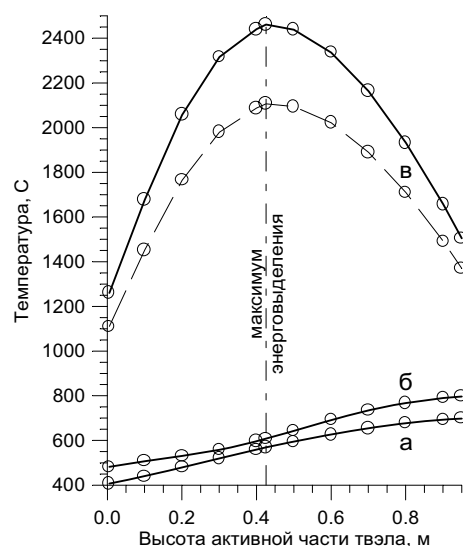


Рис. 3. Распределение температуры оболочки и топлива по высоте активной части ТВЭЛ с виброуплотненным MOX-топливом при отсутствии (—) и наличии (---) центрального отверстия в топливном сердечнике

При проведении в СФ НИКИЭТ послереакторных исследований негерметичных ТВЭЛов с таблеточным урановым топливом в нем были обнаружены рефлексии фаз, которые могут принадлежать соединениям ураната натрия. Толщина данного соединения, заполняющего зазор между топливом и оболочкой ТВЭЛА, а также замещающего часть топливной композиции, может достигать 400 мкм.

В связи с этим были проведены расчеты, позволяющие определить влияние ураната натрия на процессы теплопередачи внутри ТВЭЛА и температурный режим эксплуатации оболочки ТВЭЛА и топлива.

Расчеты проводились для негерметичного ТВЭЛА ТВС зоны малого обогащения с учетом реальных условий эксплуатации, определенных для по данным кода ГЕФЕСТ. Индивидуальные характеристики ТВЭЛА определялись по программе MIF2 [6].

В расчетах использовалось значение теплопроводности моноураната натрия  $\text{Na}_2\text{UO}_4$  – 0,95 Вт/м·°С, образование которого по данным НИИАР [7,8] возможно при взаимодействии натрия с топливом.

Результаты расчета температур топливного сердечника негерметичного ТВЭЛА (без учета разгерметизации) при величине диаметального газового зазора между топливом и оболочкой  $G(B)$ , определяемой по модели Огумы с учетом выгорания топлива  $B$ , приведены на рис. 4. Максимальное выгорание топлива в ТВЭЛЕ составило ~21,5 МВт-сут/кг. В расчетах теплофизические характеристики газового зазора выбирались для чистого гелия [9], а топлива – для диоксида урана  $\text{UO}_2$  [5].

Дальнейшие расчеты при разгерметизации оболочки ТВЭЛА и заполнении газового зазора образовавшимся уранатом натрия проводились для модели многослойной цилиндрической стенки [3] по двум направлениям:

- определение температуры топливного сердечника по рассчитанной температуре на внутренней поверхности оболочки ТВЭЛА;
- определение температуры оболочки ТВЭЛА по рассчитанной температуре в центре топлива.

Результаты расчетов при различной толщине слоя ураната натрия между топливом и оболочкой приведены в табл. 1 и 2 и на рис. 5 и 6.

Анализ полученных данных показал:

- при величине слоя ураната натрия, сопоставимого с толщиной исходного газового зазора, процесс теплопередачи улучшается за счет того, что теплопроводность ураната примерно в 3 раза выше теплопроводности гелия;

- при увеличении слоя ураната натрия происходит замещение топлива, теплопроводность которого примерно в 3,5 раза выше, и процесс теплопередачи ухудшается.

При толщине слоя ураната, равного половине диаметального зазора  $G(B)$ ,

- температура в центре топлива для первого варианта уменьшается по сравнению со стандартным расчетом (максимальная температура в центре АкЗ уменьшается на ~75°С) при неизменной температуре внутренней поверхности оболочки ТВЭЛА;

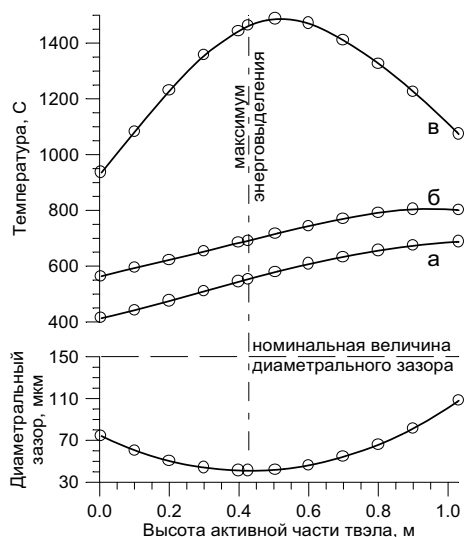


Рис. 4. Распределение диаметального зазора  $G(B)$  между топливом и оболочкой и температуры оболочки и топлива по высоте активной части негерметичного ТВЭЛА с таблеточным урановым топливом

Таблица 1

**Расчет температуры топлива по рассчитанной температуре оболочки твэла**

$h_{\text{Аз}}, \text{ м}$	$t_{\text{об}}^{\text{max}}, ^\circ\text{C}$	Толщина слоя ураната $G(B)/2$		Толщина слоя ураната 100 мкм		Толщина слоя ураната 200 мкм		Толщина слоя ураната 300 мкм		Толщина слоя ураната 400 мкм	
		$t_{\text{ф}}^{\text{нар}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ф}}^{\text{max}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ф}}^{\text{нар}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ф}}^{\text{max}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ф}}^{\text{нар}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ф}}^{\text{max}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ф}}^{\text{нар}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ф}}^{\text{max}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ф}}^{\text{нар}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ф}}^{\text{max}}, ^\circ\text{C}$
0,005	413	434	761	471	806	529	878	588	949	647	1019
0,1	441	463	896	512	962	584	1055	657	1146	730	1234
0,3	509	529	1168	601	1270	694	1396	788	1515	883	1629
0,505	579	599	1310	674	1415	771	1541	868	1661	967	1773
0,7	633	654	1246	713	1322	793	1422	874	1518	957	1611
0,9	673	695	1087	728	1125	783	1189	839	1251	895	1313
1,03	687	707	962	724	980	761	1021	799	1061	837	1100

Таблица 2

**Расчет температуры оболочки твэла по рассчитанной температуре топлива**

$h_{\text{Аз}}, \text{ м}$	$t_{\text{ф}}^{\text{max}}, ^\circ\text{C}$	Толщина слоя ураната $G(B)/2$		Толщина слоя ураната 100 мкм		Толщина слоя ураната 200 мкм		Толщина слоя ураната 300 мкм		Толщина слоя ураната 400 мкм	
		$t_{\text{ф}}^{\text{нар}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ф}}^{\text{max}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ф}}^{\text{нар}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ф}}^{\text{max}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ф}}^{\text{нар}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ф}}^{\text{max}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ф}}^{\text{нар}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ф}}^{\text{max}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ф}}^{\text{нар}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ф}}^{\text{max}}, ^\circ\text{C}$
0,005	935	564	542	567	509	572	456	577	402	583	348
0,1	1081	592	571	596	526	603	460	610	394	618	328
0,3	1356	651	631	658	566	667	482	677	398	688	313
0,505	1486	715	695	722	627	732	540	744	453	756	366
0,7	1409	769	748	775	695	784	623	793	551	803	478
0,9	1225	803	781	806	752	812	702	818	652	825	602
1,03	1074	800	781	802	765	806	731	810	698	815	664

• температура внутренней поверхности оболочки для второго варианта увеличивается (увеличение на высоте 900 мм активной зоны составляет  $\sim 110^\circ\text{C}$ ) при неизменной температуре в центре топлива.

При увеличении слоя ураната натрия между топливом и оболочкой твэла происходит

• увеличение температуры в центре топливного сердечника при неизменной температуре оболочки (первый способ), по сравнению со стандартным расчетом температура в центре АкЗ увеличивается на  $\sim 290^\circ\text{C}$  для слоя ураната 400 мкм;

• уменьшение температуры внутренней поверхности оболочки твэла при неизменной температуре топлива (второй способ), по сравнению со стандартным расчетом температура на выходе из АкЗ уменьшается на  $\sim 20^\circ\text{C}$  для слоя ураната 400 мкм.

Следует отметить, что на величину температуры оболочки твэла, определяемую по рассчитанной температуре топливного сердечника, сильное влияние оказыва-



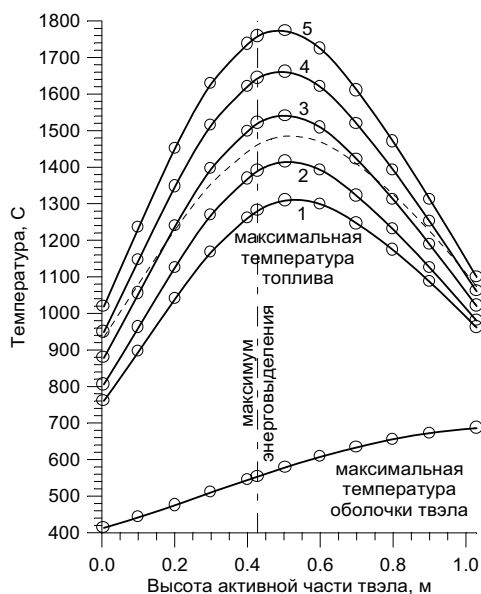


Рис. 5. Распределение максимальной температуры топлива по высоте активной части негерметичного ТВЭЛ с таблеточным урановым топливом при рассчитанной температуре оболочки в зависимости от толщины слоя ураната натрия между оболочкой и топливом: 1 –  $G(B)/2$ ; 2 – 100 мкм; 3 – 200 мкм; 4 – 300 мкм; 5 – 400 мкм; — — — — максимальная температура топлива по стандартному расчету

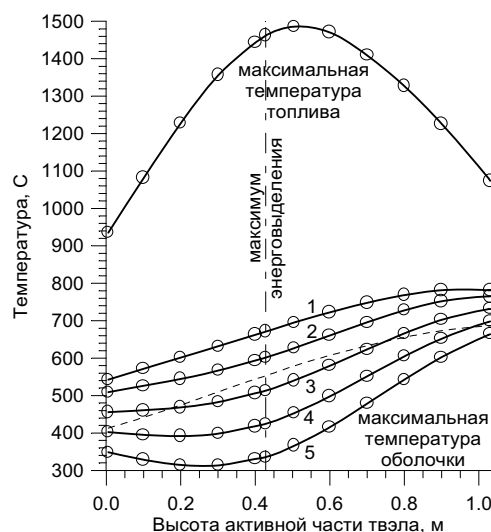


Рис. 6. Распределение максимальной температуры топлива по высоте активной части негерметичного ТВЭЛ с таблеточным урановым топливом при рассчитанной температуре топливного сердечника в зависимости от толщины слоя ураната натрия между оболочкой и топливом: 1 –  $G(B)/2$ ; 2 – 100 мкм; 3 – 200 мкм; 4 – 300 мкм; 5 – 400 мкм; — — — — максимальная температура топлива по стандартному расчету

ет величина газового зазора между топливом и оболочкой. Так при диаметрально-ном зазоре 200 мкм максимальная температура в центре топлива составит  $\sim 1950^\circ\text{C}$ , и при заполнении зазора уранатом натрия (толщина слоя 100 мкм) максимальная температура оболочки достигнет  $\sim 940^\circ\text{C}$  в центре АкЗ (на выходе из АкЗ температура составит  $\sim 830^\circ\text{C}$ ).

Таким образом, можно сделать вывод, что величина температуры топливного сердечника ТВЭЛ, определяемая по рассчитанной температуре внутренней поверхности оболочки, при наличии между ними прослойки ураната натрия толщиной до 400 мкм не приводит к превышению безопасных пределов эксплуатации ТВЭЛ (температура топлива не достигает температуры плавления 2920 K [9]). Температура внутренней поверхности оболочки ТВЭЛ, определяемая по рассчитанной температуре в центре топлива, превышает допустимое значение  $710^\circ\text{C}$  в начальный момент заполнения газового зазора натрием и образования ураната; при толщине слоя соединения более 200 мкм значение температуры становится ниже верхнего предела. Однако можно предположить, что реальный процесс теплообмена внутри ТВЭЛ при наличии ураната натрия является комбинацией обоих рассмотренных вариантов, и действительные температуры компонентов ТВЭЛ не приведут к развитию повреждения, являющегося первопричиной попадания теплоносителя под оболочку ТВЭЛ.

### Литература

1. Oguma M. Cracking and Relocation Behaviour of Nuclear Fuel Pellets During Rise to Power// Nuclear Engineering and Design. – 1983. – 76. – P. 35.



2. Кокорев Л.С., Харитонов В.В. Теплогидравлические расчеты и оптимизация ядерных энергетических установок: Учеб. пособие для вузов/Под ред. В.И. Субботина. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.
3. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
4. Уолтер А., Рейнольдс А. Реакторы -размножители на быстрых нейтронах/Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 624 с.
5. Методические указания и рекомендации по теплогидравлическому расчету активных зон быстрых реакторов. РТМ 1604.008-88/Под общ. ред. А.В. Жукова, А.П. Сорокина. – ФЭИ, 1988.
6. Программное обеспечение ЕСЭВМ. Программа поканального теплогидравлического расчета ТВС быстрых реакторов с учетом формоизменения «MIF2». Описание применения 04 371 – 02 31 01. Инв. № 1779Э. – ОКБМ, Нижний Новгород, 1989.
7. Взаимодействие жидкого натрия с окисным топливом быстрых реакторов. Отчет НИИАР. УДК 621.039.542, 1987 г.
8. Adamson M.Y., Aitken E.A., Evans S.K. Thermodynamic stages of the sodium fuel reactor at General Electric/Proceedings of a Panel Vienna 7-11 August 1972. Behaviour and chemical state of irradiated ceramic fuel. IAEA, Vienna, 1974, p. 411-420.
9. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник. – М.: Атомиздат, 1968. – 484 с.

Поступила в редакцию 15.05.2009

#### **УДК 621.039**

*Implementation of the Decommissioning Programmes of Beloyarsk NPP Power Units 1 and 2/N.N. Oshkanov, V.F. Roslyakov, B.I. Chubarov, V.A. Makhov, E.A. Vinivitin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 7 pages, 5 illustrations. – References, 9 titles.*

The article overviews the generalized list of the work presently in hand under the programmes of the decommissioning of Beloyarsk NPP power units 1 and 2.

#### **УДК 621.039:519.7**

*Development of the optimal algorithms of the NPP decommissioning using the methods of mathematical simulation/O.L. Tashlykov, A.N. Seseikin, S.E. Shcheklein, A.G. Chechentsov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 6 pages, 2 tables, 1 illustration. – References, 8 titles.*

The required scope of the source information on the radiation background in the power unit premises for the development of the systems of the optimal NPP decommissioning planning is determined.

The ways are proposed to increase the efficiency of utilization of the obtained information on the radiation background for optimization of the sequence of the dismantling of the radioactive equipment by means of the mathematical simulation in order to minimize exposure and material costs.

#### **УДК 621.039.526**

*Research into the Temperature Behaviour of the Irradiated Fuel Sub-Assemblies of the First Phase of the Beloyarsk NPP under the conditions of the «Dry» Storage/S.V. Bogatov, V.P. Zabegaev, A.I. Karpenko, E.L. Rozenbaum; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 6 pages, 4 illustrations. – References, 4 titles.*

The article presents the computational and the experimental investigations of the temperature behaviour of the standard cask holding thirty five irradiated fuel sub-assemblies under the dry storage in the process pit. Research showed that the heat-up due to the residual heat did not cause the excessive growth of temperature even under the conditions of the complete absence of the heat removal by ventilation.

#### **УДК 621.039.548**

*Methodology and Results of the Operational Calculation of the Temperature of the Fuel in the Fuel Pins of the BN-600 Reactor Fuel Sub-Assemblies/S.V. Bogatov, M.G. Kireev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 2 tables, 6 illustrations. – References, 9 titles.*

The article presents the methodology of the determination of the peak fuel temperature and computational investigations of the temperature behaviour of the fuel in the fuel pins of the fuel sub-assemblies of various types during the BN600 reactor operation. The effect of the sodium uranate in the gap between fuel and cladding of the fuel pin on the heat transfer processes is considered.

#### **УДК 621.311.25:621.039**

*Features of the Vibration Conditions of the Pumping Units of the Primary Sodium Pumps of the BN-600 Power Unit under the conditions of Two-Loop Operation/E.Yu. Badanin, P.P. Govorov, V.A. Drozdenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 4 pages, 2 illustrations. – References, 5 titles.*

The article presents the results of the investigation of the vibration conditions of the pumping components of the primary sodium pumps under the two-loop operation of the power unit. The comparative analysis has been conducted, and the distinctive features of the conditions of the pumping component operation under these circumstances have been found.