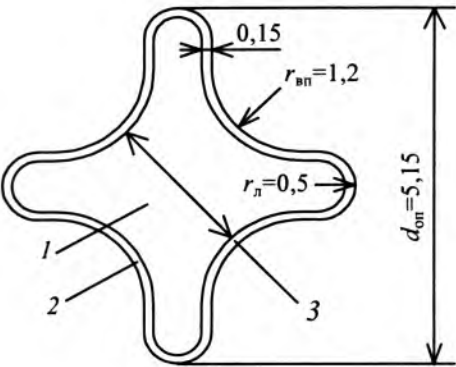


УДК 621.039.546

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ КРЕСТООБРАЗНОГО ТВЭЛА
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Федосеев В.Е., Цыканов В.А., Старков В.А. (ГНЦ РФ — НИИАР)

Достижение плотности потока быстрых нейтронов более $2 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ в высокопоточных реакторах и конвертерах-бустерах сопряжено с разработкой твэла, работоспособного при высокой температуре и тепловой нагрузке. На настоящий момент наиболее перспективным считается твэл реактора СМ, доказавший свою работоспособность при плотности теплового потока (средней по периметру) 15 МВт/м^2 , максимальной температуре топливного сердечника $500\text{—}550 \text{ }^\circ\text{C}$ и выгорании до 60% [1].



Р и с. 1. Поперечное сечение твэла: 1 — топливный сердечник; 2 — оболочка; 3 — минимальный размер сердечника

Целью настоящей работы является поиск путей модернизации штатного твэла реактора СМ для увеличения допустимой плотности теплового потока при сохранении или снижении максимальной температуры топливной композиции.

Крестообразный твэл характеризуется диаметром описывающей окружности ($d_{оп}$), радиусом впадины ($r_{вп}$) и скругления лопасти ($r_{л}$) (рис. 1). Его основные геометрические и конструкционные характеристики таковы [2]:

Площадь поперечного сечения, мм ² . . .	10,108
Площадь топливного сердечника, мм ² . . .	7,655
Наружный периметр, мм . . .	16,83
Длина активной части, м . . .	0,35
Материал оболочки . . .	Сталь ОХ16Н15МЗБ
Материал топливного сердечника:	
матрица . . .	Медь с бериллиевой бронзой
делящийся материал . . .	UO ₂
Загрузка ²³⁵ U, г . . .	5
Обогащение, % . . .	90

Рассмотрим изменение теплотехнических характеристик твэла, связанное с изменением радиуса впадины, скругления лопасти и использованием центрального вытеснителя. В расчетах приняты постоянными следующие параметры:

Мощность твэла, кВт . . .	70,7
Коэффициент неравномерности распределения энерговыделения по высоте . . .	1,25
Теплоноситель:	
температура, $^\circ\text{C}$. . .	100
давление, МПа . . .	5
расход в ТВС, м ³ /ч . . .	121,5
Температура насыщения теплоносителя, $^\circ\text{C}$. . .	264

Теплопроводность, Вт/(м·°С):

матрицы . . .	220
UO ₂ . . .	4,5
оболочки . . .	17,4
Толщина оболочки, мм . . .	0,15

Для приведенных параметров обеспечивается средняя по периметру твэла плотность теплового потока на полувысоте активной части штатного твэла 15 МВт/м². Максимальная плотность теплового потока (во впадине) составляет примерно 25 МВт/м², при этом обеспечивается работоспособность твэла в бескризисном режиме теплообмена. Средняя скорость теплоносителя в ТВС составляет 12,4 м/с. ТВС состоит из кожуха квадратного сечения внутренним размером 68×68 мм и вмещает 188 твэлов. Шаг решетки твэлов 5,23 мм.

При увеличении радиуса впадины (при постоянном радиусе скругления лопастей) возрастает площадь поперечного сечения твэла, что, с одной стороны, уменьшает объемную плотность теплового потока в сердечнике и повышает теплопроводность топливной композиции при постоянной загрузке ²³⁵U, с другой, снижает периметр твэла и соответственно теплопередающую поверхность. Повышение площади твэла вызывает уменьшение площади проходного сечения теплоносителя в ТВС и при постоянстве расхода рост средней скорости теплоносителя и увеличение коэффициента теплоотдачи.

В расчетах использовали следующие математические зависимости: площадь поперечного сечения твэла [3]

$$S_{\text{ТВ}} = 4[r_{\text{л}}d_{\text{оп}} - 1,429r_{\text{л}}^2 + 0,215r_{\text{вп}}^2];$$

теплопроводность топливной композиции [4]

$$\lambda_{\text{к}} = \frac{(3V_{\text{м}} - 1)\lambda_{\text{м}} + (3V_{\text{т}} - 1)\lambda_{\text{т}}}{4} + \sqrt{\frac{[(3V_{\text{м}} - 1)\lambda_{\text{м}} + (3V_{\text{т}} - 1)\lambda_{\text{т}}]^2}{16} + \frac{\lambda_{\text{м}}\lambda_{\text{т}}}{2}},$$

где $\lambda_{\text{к}}$, $\lambda_{\text{м}}$, $\lambda_{\text{т}}$ — коэффициент теплопроводности топливной композиции, матрицы и топливной фазы соответственно; $V_{\text{м}}$, $V_{\text{т}}$ — объемная доля матричного материала и топливной фазы соответственно;

коэффициент неравномерности распределения плотности теплового потока по периметру твэла [5]

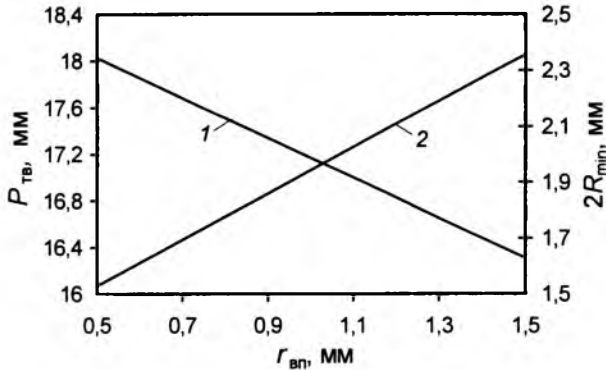
$$K_q = 1 + (0,2 + 0,25(\varepsilon - 0,44))\sqrt{2Bi},$$

где ε — отношение максимального размера твэла к минимальному; Bi — произведение половины минимального размера твэла на отношение коэффициента конвективной теплоотдачи к теплопроводности топливной композиции. Формула расчета K_q адаптирована с погрешностью $\pm 1\%$ для условий теплообмена с поверхностным кипением теплоносителя для $\varepsilon = 1,08\text{—}2,9$, $Bi = 0\text{—}1$;

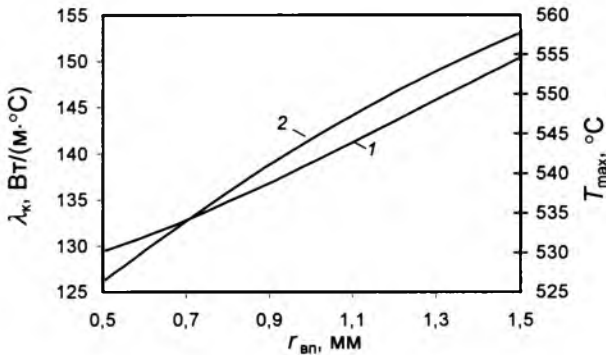
максимальная температура топливного сердечника

$$T_{\text{max}} = T_{\text{в}}K_t + 7,8q_sK_q + 0,266\frac{q_{\text{в}}^{\text{max}}R_{\text{min}}^2}{\lambda_{\text{к}}},$$

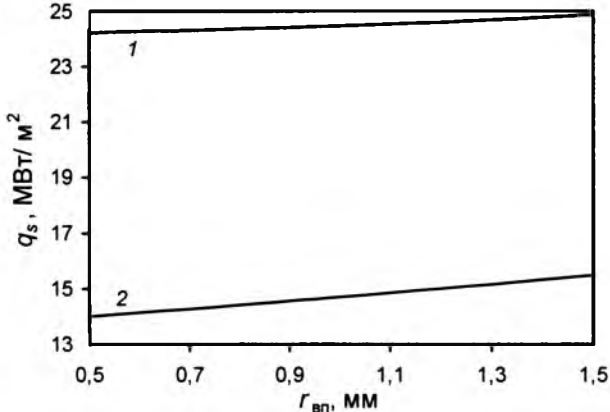
где T_w — средняя температура наружной поверхности оболочки ($T_w = 283\text{ }^{\circ}\text{C}$); K_t — коэффициент неравномерности распределения температуры по периметру твэла ($K_t = 1,026$); q_s — средняя по периметру твэла плотность теплового потока, МВт/м²; $q_v^{\max}$ — максимальная объемная плотность теплового потока, МВт/м³; $R_{\min}$ — половина минимального размера топливного сердечника, мм.



Р и с. 2. Зависимость внешнего периметра твэла (1) и минимального размера топливного сердечника (2) от радиуса впадины



Р и с. 3. Зависимость теплопроводности топливной композиции (1) и максимальной температуры сердечника твэла (2) от радиуса впадины



Р и с. 4. Зависимость максимальной (1) и средней плотности теплового потока (2) от радиуса впадины

Зависимость внешнего периметра твэла ($P_{тв}$) и минимального размера топливного сердечника от радиуса впадины представлена на рис. 2, зависимость максимальной температуры сердечника твэла и теплопроводности топливной композиции — на рис. 3. Радиус скругления лопасти равен 0,5 мм, радиус впадины варьируется от 0,5 до 1,5 мм. Радиус 1,5 мм соответствует почти предельному значению, при котором происходит плавное сопряжение окружностей лопасти креста. Максимум температуры достигается на центральной оси топливного сердечника.

Увеличение радиуса впадины твэла с 0,5 до 1,5 мм привело к росту теплопроводности топливной композиции от 129 до 151 Вт/(м·°C) и, несмотря на это, максимальной температуры с 526 до 558 °C (см. рис. 3). Наименьшая температура по сравнению со штатным вариантом ($r_{вп} = 1,2$ мм) наблюдается при минимальном радиусе впадины 0,5 мм. Снижение максимальной температуры составляет 24 °C. Влияние радиуса впадины на среднюю по периметру твэла и максимальную плотность теплового потока показано на рис. 4. Наибольшая плотность теплового потока равна 24,9 МВт/м² при радиусе впадины 1,5 мм. Коэффициент неравномерности рас-

пределения плотности теплового потока в этом случае наименьший и составляет 1,61. Уменьшив радиус впадины до 0,5 мм, можно увеличить мощность твэла примерно на 10%, при этом максимальная температура сердечника, как и в штатном твэле, будет равна 550 °С.

Увеличение радиуса скругления лопасти при неизменном радиусе впадины приводит к повышению теплопроводности топливной композиции и уменьшению объемной плотности теплового потока в сердечнике, но одновременно и к росту минимального размера сердечника и снижению периметра твэла (см. таблицу). Радиус впадины при этом равен 0,5 мм.

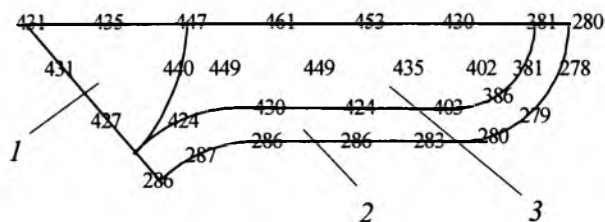
Характеристики твэла и ТВС

Параметр	Радиус скругления лопасти, мм				
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75
Теплопроводность топливной композиции, Вт/(м·°С)	100	129	146	157	161
Максимальная объемная плотность теплового потока, МВт/м ³	51 980	39 120	31 810	27 130	25 380
Периметр твэла, мм	18,37	18,03	17,63	17,34	17,17
Минимальный размер сердечника, мм	1,25	1,53	1,81	2,09	2,24
Максимальная температура сердечника, °С	539	526	525,5	529	532
Водно-урановое отношение	45,3	31	22,9	17,7	15,8
Потери давления на трение, МПа	0,15	0,2	0,26	0,35	0,41

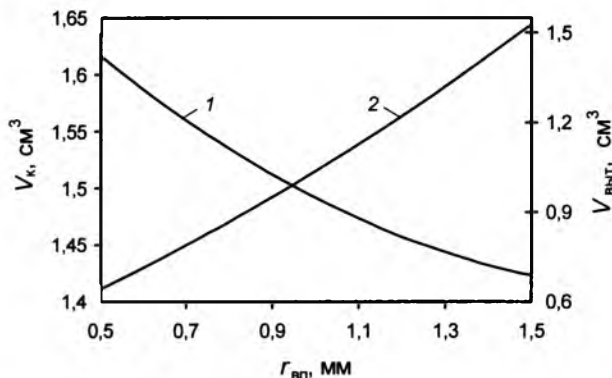
Следует отметить, что при вариациях размеров твэлов изменяется площадь проходного сечения теплоносителя. Следовательно, изменяется при постоянной загрузке урана в твэл отношение концентрации ядер водорода и ^{235}U , от которого зависят физические характеристики реактора.

Минимум температуры сердечника почти соответствует скруглению лопасти в штатном твэле. Увеличение радиуса скругления лопасти до 0,6 мм и более приводит к существенному росту гидравлического сопротивления ТВС, снижению водно-уранового отношения и соответственно к изменению нейтронно-физических характеристик реактора. Уменьшение радиуса скругления лопасти до 0,4 мм вызывает увеличение максимальной температуры сердечника, рост примерно в 1,5 раза водно-уранового отношения и при малой толщине лопасти может осложнить изготовление твэла. По совокупному воздействию рассмотренных факторов следует признать, что оптимальный радиус скругления лопасти равен 0,5 мм.

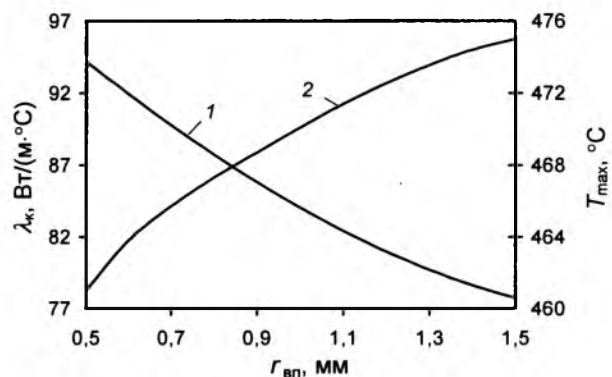
Возможным путем уменьшения коэффициента неравномерности распределения плотности теплового потока по периметру и снижения максимальной температуры топливной композиции твэла является размещение в центральной части сердечника вытеснителя [6]. Рассмотрим цилиндрический вытеснитель, помещенный внутри твэла и соприкасающийся с внутренней поверхностью оболочки во впадинах. Вытеснитель выполнен однородным и может быть изготовлен из слабопоглощающих нейтроны сплавов. Теплопроводность вытеснителя принята равной 94 Вт/(м·°С).



Р и с. 5. Распределение температуры по сечению твэла с центральным вытеснителем: 1 — центральный вытеснитель; 2 — оболочка; 3 — топливный сердечник



Р и с. 6. Зависимость объема топливной композиции (1) и объема вытеснителя (2) от радиуса впадины



Р и с. 7. Зависимость теплопроводности топливной композиции (1) и максимальной температуры сердечника твэла с вытеснителем (2) от радиуса впадины, рассчитанная по программе МКЕ

Использование центрального вытеснителя в твэле приводит к значительному снижению максимальной температуры сердечника (см. рис. 3, 7) и уменьшению коэффициента неравномерности распределения плотности теплового потока (рис. 8). Использование вытеснителя в твэле позволяет существенно увеличить допустимую плотность теплового потока при ограничении максимальной температуры топливной композиции (рис. 9). Так, при максимальной температуре 500 °C допустимую плотность теплового потока можно увеличить от 12,8 МВт/м² при сплошном топливном сердечнике до 16,2 МВт/м² при сердечнике с центральным вытеснителем. При этом максимальная плотность теплового потока составит

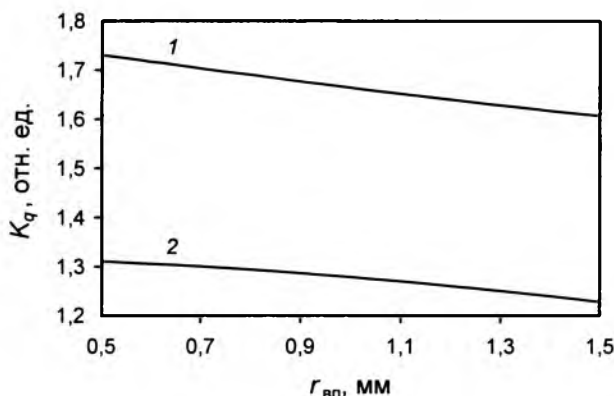
Температурное поле по сечению твэла рассчитывали по программе МКЕ, реализующей метод конечных элементов для решения двумерных уравнений теплопроводности [7]. В качестве расчетной модели принято поперечное сечение 1/8 части твэла. Приведенные на рис. 5 результаты расчета показывают распределение температуры при радиусе впадины 0,5 мм. Максимальная температура сердечника составляет 461 °C и смещена в лопасть креста.

Расчетным путем определено влияние радиуса впадины на изменение объема вытеснителя ($V_{\text{выт}}$) и топливной композиции (V_k) (рис. 6) и максимальной температуры сердечника твэла и теплопроводности топливной композиции (рис. 7). В этом случае наименьшая максимальная температура 461 °C наблюдается при наибольшей теплопроводности топливной композиции 94 Вт/(м·°C) и радиусе впадины 0,5 мм. Максимальная плотность теплового потока составляет 18,4 МВт/м², коэффициент неравномерности распределения плотности теплового потока равен 1,31.

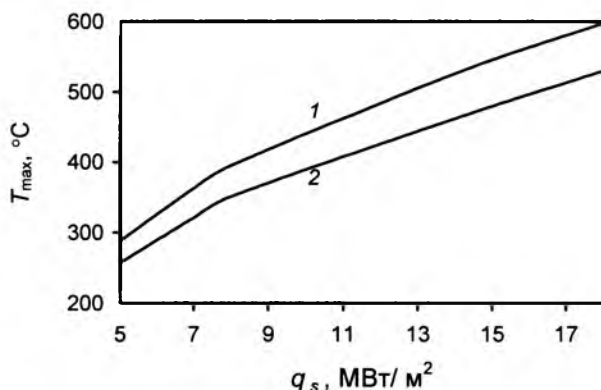
21,1 МВт/м², что обеспечивает увеличение запаса до кризиса теплообмена примерно в 1,2 раза по сравнению со штатным твэлом.

Одним из путей снижения плотности теплового потока с поверхности твэла при сохранении постоянной мощности ТВС может служить уменьшение внешнего размера твэла. Так, при увеличении числа твэлов в штатном кожухе ТВС со 188 до 247 диаметр описывающей окружности составит 4,46 мм (рис. 10). Толщина оболочки, радиус впадины и скругления лопасти у них одинаковы и равны 0,15, 1,2 и 0,5 мм соответственно. При одинаковой нагрузке ²³⁵U в ТВС 940 г теплопроводность топливных композиций для твэлов с диаметром описывающей окружности 5,15 и 4,46 мм составляет 143 и 153 Вт/(м·°C). Допустимая плотность теплового потока при максимальной температуре 500 °C для твэла с диаметром описывающей окружности 4,46 мм в 1,1 раза больше, чем для твэла с диаметром 5,15 мм. Однако уменьшение размера твэлов приводит к увеличению их числа в ТВС и объемной доли конструкционных материалов, снижению водно-уранового отношения и росту гидравлического сопротивления ТВС. Все это необходимо учитывать при выборе конкретных решений.

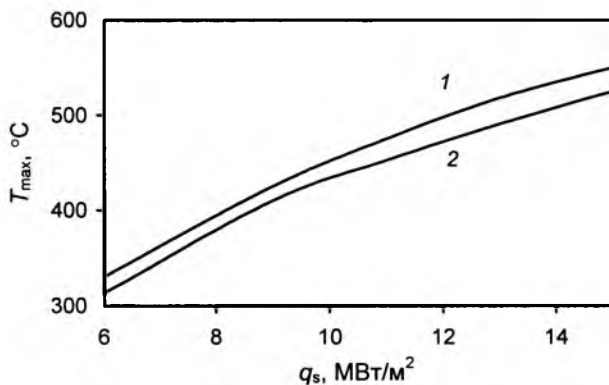
Таким образом, анализ показывает, что имеются конструктивные пути улучшения теплотехнических характеристик



Р и с. 8. Зависимость коэффициента неравномерности распределения плотности теплового потока от радиуса впадины: 1, 2 — твэл со сплошным топливным сердечником и вытеснителем соответственно



Р и с. 9. Зависимость максимальной температуры топливного сердечника от средней по периметру твэла плотности теплового потока: 1, 2 — твэл со сплошным топливным сердечником и вытеснителем соответственно



Р и с. 10. Зависимость максимальной температуры топливного сердечника от средней по периметру твэла плотности теплового потока: 1, 2 — твэл с диаметром описывающей окружности 5,15 и 4,46 мм соответственно

твэлов для высокопоточных реакторов, но при их использовании следует учитывать как технологические возможности изготовления, так и необходимые физические характеристики реактора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цыканов В.А., Клинов А.В., Старков В.А. и др. Модернизация активной зоны реактора СМ для решения задач материаловедения. — Атомная энергия, 2002, т. 93, вып. 3, с. 167—172.
2. Бурукин В.П., Клинов А.В., Старков В.А., Цыканов В.А. Результаты исследований в обоснование работоспособности ураноемкого твэла реактора СМ. — В кн.: Сборник трудов. Димитровград, ГНЦ РФ НИИАР, 2003, вып. 2, с. 35—45.
3. Цыканов В.А. Тепловыделяющие элементы для исследовательских реакторов. Монография. Димитровград, 2001. 250 с.
4. Самойлов А.Г., Каштанов А.И., Волков В.С. Дисперсионные твэлы. Т. 2. Конструкция и работоспособность. М.: Энергоатомиздат, 1982.
5. Гарусов Е.А., Грачев С.Д. Теплоотвод от тел крестообразного поперечного сечения: Препринт ЛИЯФ № 660, 1981.
6. Старков В.А., Федосеев В.Е. Распределение температуры и плотности теплового потока по периметру твэла крестообразного сечения. — В кн.: Сборник трудов. Димитровград, ГНЦ РФ НИИАР, 2003, вып. 2, с. 3—8.
7. Грачев В.Д. Некоторые вопросы математической реализации метода конечных элементов в задачах реакторной теплофизики: Препринт НИИАР-6 (652). М., ЦНИИатоминформ, 1985.

Поступила в Редакцию 2.08.04

УДК 621.039.58:621.039.516.4

БЕЗОПАСНОСТЬ РЕГЕНЕРАЦИИ ОТРАБОТАВШЕГО ТОПЛИВА БОР-60 ПИРОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

*Серебряков В.В., Кириллович А.П., Бычков А.В., Кормилицын М.В.,
Ишунин В.С. (ГНЦ РФ — НИИАР)*

Проведенный в НИИАРе в 2000—2002 гг. демонстрационный эксперимент по регенерации укрупненной партии отработавшего ядерного топлива БОР-60 стал очередным этапом в обосновании замкнутого топливного цикла быстрых реакторов на основе неводной технологии получения гранулированного смешанного уран-плутониевого топлива, пригодного для изготовления твэлов с виброуплотненным сердечником [1, 2]. Наряду с технологическими исследованиями в эксперименте подробно изучали безопасность процесса и его отдельных стадий.

Радиационно-экологическая безопасность на стадиях подготовки отработавших ТВС БОР-60 к пирозлектрохимической регенерации рассмотрена в работах [3, 4]. В настоящей статье изложены результаты исследования безопасности собственно процесса регенерации отработавшего топлива, являющейся наиболее ответственной стадией замкнутого топливного цикла.

Характеристики перерабатываемого продукта. Исходным продуктом переработки являлось отделенное от оболочек методом волоксации отработавшее топливо шести ТВС БОР-60: двух ТВС на основе таблеточного уранового топлива выгоранием 10,5—11,9% тяж. ат., выдержкой 10,4—23,7 года и четырех с вибро-