

Т а б л и ц а 6. Удельная теплоемкость UO_2 , ThO_2 и $(\text{Th}, \text{U})\text{O}_2$ с массовой долей UO_2 25%,
кДж/(кг·°C)

T, °C	ThO_2 [10]	UO_2 [11]	$(\text{Th}, \text{U})\text{O}_2$	
			Эксперимент	Расчет на теоретическую плотность
300	0,243	0,286	0,253	0,253
400	0,246	0,305	0,263	0,258
500	0,249	0,315	0,270	0,263
600	0,251	0,322	0,276	0,266
700	0,254	0,327	0,281	0,269
800	0,257	0,330	0,286	0,272
900	0,260	0,334	0,292	0,275
1000	0,263	0,337	0,296	0,278
1100	0,266	0,340	0,301	0,281
1200	0,269	0,342	0,308	0,287

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Майоров А.А., Браверман И.Б. Технология получения порошков керамической двуокиси урана. М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Курина И.С. Способ получения изделий из керамики. Патент 2135429, Россия. 27.08.1999 г.
3. Курина И.С. Влияние температуры прокаливания порошков на качество оксидного топлива. — Атомная энергия, 1999, т. 86, вып. 3, с. 189—194.
4. Казанцев Г.Н., Курина И.С., Овчинников И.Я и др. Технологические возможности создания топливных композиций, содержащих торий. — Известия вузов, Ядерная энергетика, 1999, № 1, с. 19—24.
5. Курина И.С., Дворянин А.М., Гудков Л.С. Получение и исследование топливных торийсодержащих композиций. — Атомная энергия, 2000, т. 88, вып. 5, с. 346—353.
6. Курина И.С., Мосеев Л.И., Павлович В.Б. Изготовление оксидного топлива без урана-238 для утилизации плутония. — В сб.: Межд. конф. «Атомная энергетика на пороге XXI века», 8—10.06.2000, Электросталь, с. 134—145.
7. Курина И.С., Шарапов В.Н., Мосеев Л.И. и др. Расчетные и технологические разработки возможности использования тория и плутония в реакторах типа ВВЭР. — В кн.: Избранные труды ФЭИ-2000, ч. 1, с. 39—47.
8. Tyagi A., Mathews M. Letter to the editors. Thermal expansion of ThO_2 —2% UO_2 by HT-XRD. — J. Nucl. Mater., 2000, v. 278, p. 123—125.
9. Peddicord K., Cunningham M., Tripathy A. Porosity correction to thermal conductivity based on analytical temperature solutions. — Trans. Am. Nucl. Soc., 1978, v. 28, p. 548.
10. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М.: Атомиздат, 1969.
11. Fink J., Petry M. Thermophysical Properties of Uranium Dioxide. ANL/Re-97/2.
12. Олейник Б.М. Точная калориметрия. М.: Изд-во стандартов, 1964.

Поступила в Редакцию 10.12.01

УДК 621.039.546

ПАРАМЕТРЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТВЭЛОВ РЕАКТОРА ПИК

Агеенков В.И., Волков В.С., Солонин М.И. (ФГУП ВНИИНМ им. А.А. Бочвара),
Гарусов Е.А., Звездкин В.С., Коноплев К.А. (ПИЯФ им. Б.П. Константинова),
Бек Е.Г., Ильяшик М.И., Потоскаев Г.Г., Самохин М.Г., Цибуля В.А.
(ОАО «Машиностроительный завод»)

В настоящее время на территории Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова сооружается высокопоточный исследовательский реактор ПИК (пучковый, исследовательский, корпусной) мощностью 100 МВт [1]. Научным руководителем проекта реактора ПИК, расчетными оценками и конструктивными раз-

работками которого определены основные физические параметры реактора [2], выбраны материалы и размеры его основных узлов (активной зоны, отражателя, центрального экспериментального канала, системы СУЗ и т.д.) [3]. Параметры оптимизированы на основе минимизации затрат на эксперименты при максимальной производительности и с учетом теплотехнических и технологических ограничений [4].

Реактор ПИК создается как мощный стационарный источник нейтронов в широком спектре энергии для изучения фундаментальных свойств материи, исследований в области атомной и ядерной физики, физики твердого тела и сверхпроводимости, а также для радиобиологических и прикладных исследований. Высокая плотность потоков тепловых нейтронов ($\sim 4,5 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ в центральном экспериментальном канале и от 10^{14} до $1,2 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ в тяжеловодном отражателе на донышках экспериментальных каналов и в местах установки источников горячих и холодных нейтронов) обеспечивает широкие возможности для проведения высокоточных экспериментов [5]. Этому также способствует организация виброзащиты экспериментального зала, применение частично разборной биологической защиты реактора, создание системы вывода холодных нейтронов, а также многомашинного автоматизированного комплекса для обработки и хранения информации. Планируемая программа научных исследований на аппаратурной базе реактора ПИК подробно освещена в обзорах [6, 7].

Концептуальная технологическая схема установки ПИК разработана совместно с генеральным конструктором проекта — НИКИЭТ, проект комплекса ПИК — совместно с генеральным проектировщиком — ВНИПИЭТ. Учитывая современные повышенные требования к радиационной и ядерной безопасности реакторных установок, в первоначальный вариант проекта комплекса ПИК внесены изменения [8]. Современное состояние работ по созданию комплекса ПИК на данное время освещено в публикациях [7, 9].

Легководная активная зона реактора ПИК объемом около 51 л представляет собой ансамбль из 18 ТВС, из которых 12 шестигранные, 6 — квадратные [1]. Шестигранная ТВС содержит 241 твэл типа СМ-3, квадратная — 161 твэл. Твэлы расположены в треугольной решетке с шагом 5,23 мм. Номинальная длина активной части твэла 50 см, обогащение по ^{235}U 90%, количество ^{235}U в твэле 7,14 г (из расчета $7,93 \pm 0,1$ г смеси изотопов урана на твэл), полная начальная загрузка ^{235}U активной зоны — 27,5 кг [1]. ТВС устанавливаются на опорной решетке внутри двойного стального корпуса внутренним диаметром 390 мм с внутренней обечайкой толщиной 8 мм и внешней обечайкой толщиной 3 мм. Обечайки образуют кольцевой зазор шириной 4 мм, являющийся частью автономного контура, в котором циркулирует тяжелая вода под давлением 1,3 МПа, охлаждающая стенки корпуса. Теплоотвод от твэлов активной зоны осуществляется циркулирующим сверху вниз потоком легкой воды под давлением 5 МПа и температурой на входе 50 °С. Полный расход теплоносителя внутри корпуса реактора составляет $\sim 2400\text{—}3000 \text{ м}^3/\text{ч}$ [1, 5, 8]. Активная зона, окруженная стальным корпусом, помещена в бак с тяжелой водой под давлением 0,3 МПа и температурой 50—60 °С. Бак со встроенными в него экспериментальными каналами имеет диаметр 2,4 м и высоту 2—2,5 м. Бак тяжеловодного отражателя и корпус активной зоны установлены в легководном бассейне глубиной 12 м, что обеспечивает достаточную радиационную защиту в случае аварийного разрыва технологических контуров.

Внутренний ряд шестигранных ТВС охватывает собой направляющую — шестигранную циркониевую призму, в центре которой проходит центральный экспериментальный канал, охлаждаемый легкой водой под давлением 5 МПа.

Регулирование и аварийная защита реактора осуществляются двумя автономными системами регуляторов: шторой и восемью регуляторами, погружаемыми в тяжеловодный отражатель. Штора состоит из двух охватывающих центральный экспериментальный канал и раздвигающихся вверх и вниз цилиндрических обечаек, содержащих

поглотитель — гафний. Рабочая часть регуляторов выполнена в виде пластин, включающих решетку стержней с поглотителем Eu_2O_3 [8].

Для уточнения и оптимизации физических параметров активной зоны и получения предварительных оценочных значений нейтронных потоков в экспериментальных каналах создана и постоянно функционирует полномасштабная физическая модель реактора ПИК [10].

В реакторе ПИК использованы твэлы такого же типа, как и в активной зоне реконструированного реактора СМ-3 [11], для которых накоплен многолетний успешный опыт эксплуатации при значительных тепловых нагрузках (до и более 10 МВт/м^2) и большой глубине выгорания (в среднем 35—40%). Твэлы отличаются длиной топливного слоя — 350 мм для твэлов СМ-3, 500 мм для твэлов ПИК. Выбор твэла такого типа для реактора ПИК связан с идентичностью параметров активных зон этих реакторов (мощность 100 МВт, объем активной зоны ~ 50 л, давление в первом контуре 5 МПа). Высокие значения теплового потока на поверхности твэла $q_s \sim q_v/\zeta$ (q_v — удельное энерговыделение; ζ — удельная теплопередающая поверхность) диктуются необходимостью получения форсированных нейтронных потоков в областях расположения экспериментальных устройств [12].

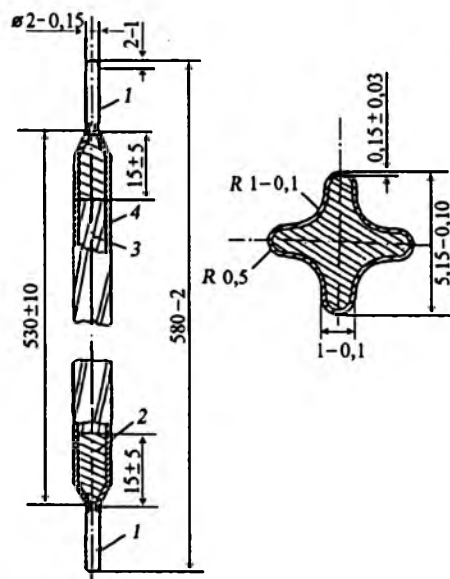
Конструкция твэлов, используемых в активных зонах СМ-3 и ПИК, разработана ВНИИНМ им. А.А. Бочвара. Твэлы изготавливаются ОАО «Машиностроительный завод».

Твэл дисперсионного типа имеет вид стержня крестообразного профиля [13]. Его лопасти закручены спирально по длине с шагом 300 ± 40 мм. Конструкция твэла и его размеры представлены на рис. 1. Номинальные значения основных параметров твэла таковы [11, 13]: диаметр 5,15 мм, периметр боковой поверхности 17,16 мм, площадь поперечного сечения твэла $9,73 \text{ мм}^2$, площадь поперечного сечения сердечника $7,23 \text{ мм}^2$, толщина оболочки 0,15 мм, площадь ее поперечного сечения $2,5 \text{ мм}^2$, загрузка урана 90%-ного обогащения в твэле с непрофилированным топливом 7,93 г.

Оболочка твэла выполнена из стали ЭИ-847. Топливный сердечник герметизируется концевыми заглушками из нержавеющей стали 0Х16Н15МЗБП, приваренными к оболочке. Между концевыми заглушками и сердечником имеются пробки из медного сплава, не содержащие делящегося материала.

Сердечник твэла выполнен из дисперсионной композиции на основе диоксида урана в медной (с добавкой бериллиевой бронзы) матрице. Массовая доля бериллия в топливной композиции равна 0,6%. Объемная доля диоксида урана в сердечнике составляет примерно 25%.

Материалы твэла выбраны в соответствии с требованиями обеспечения его работоспособности при форсированных нагрузках, большой скорости теплоносителя и высоком выгорании урана. Оболочка из нержавеющей стали имеет достаточную механическую прочность и эрозионно-коррозионную стойкость. Матричный материал сердечника обладает высокой теплопроводностью и хорошими физико-механическими характеристиками. Указанное сочетание свойств материалов сердечника и оболочки обеспечивает при изготовлении твэла прочное диффузионное сцепление между ними, что приводит к снижению температурных перепадов в твэле и повышению его механической



Р и с. 1. Твэл реактора ПИК: 1 — концевая заглушка; 2 — пробка; 3 — сердечник; 4 — оболочка

жесткости и прочности. В качестве делящейся фазы топлива выбран диоксид урана, что обеспечивает высокую концентрацию ^{235}U в единице объема активной зоны ($0,54 \text{ г/см}^3$ в реакторе ПИК [1], $0,49 \text{ г/см}^3$ в СМ-3 [11]). Диоксид урана радиационно стоек, совместим с материалом матрицы и оболочки, инертен в воде, его низкая теплопроводность компенсируется высокой теплопроводностью матричного материала.

Температура плавления материала матрицы равна $\sim 1000\text{--}1080^\circ\text{C}$, теплопроводность в температурном интервале $100\text{--}400^\circ\text{C}$ составляет $1,8\text{--}2,2 \text{ Вт/(см}\cdot\text{град)}$, теплоемкость $0,38\text{--}0,47 \text{ Дж/(г}\cdot\text{град)}$ [13—15]. В этом же температурном интервале теплопроводность топливной композиции плотностью $9,28 \text{ г/см}^3$ с объемной долей UO_2 25% составляет $0,9\text{--}1,1 \text{ Вт/(см}\cdot\text{град)}$, ее удельная теплоемкость равна $0,35\text{--}0,42 \text{ Дж/(г}\cdot\text{град)}$ [13]. Изотопный состав урана в каждой партии твэлов устанавливается сертификатом завода по разделению изотопов. Ориентировочные данные приведены в работе [16].

Особенностью твэла крестообразного профиля является неравномерность теплового потока по периметру твэла — увеличение на межлопастном участке и снижение на концевых частях лопастей. Эта неравномерность зависит от конфигурации твэла (полноты его профиля), соотношения толщины оболочки и сердечника, теплопроводности материалов, коэффициента теплоотдачи и распределения энерговыделения в твэле [17]. Снижение теплового потока на кромках лопастей позволяет устанавливать твэлы в ТВС вплотную и осуществлять их самодистанционирование за счет касания в отдельных точках спиральных перекрещивающихся лопастей соседних твэлов без перегрева и пережогов в этих точках. Принцип самодистанционирования крестообразных твэлов в ТВС приводит к упрощению конструкций ТВС и более рациональному использованию объема активной зоны за счет ликвидации дистанционирующих устройств. При этом ТВС могут быть любой геометрической формы. Большое число точек касания соседних твэлов (на длине шага закрутки лопастей 300 мм твэл имеет 26 точек касания) гарантирует их надежное дистанционирование, оставляя при этом свободу передвижения при тепловом расширении и сохраняя гибкость и упругость пучка в ТВС. Плотная упаковка твэлов и малый диаметр обеспечивают максимальную удельную теплопередающую поверхность при одновременном достаточном объеме делящегося материала (так, для бесконечной регулярной решетки твэлов с шагом $5,23 \text{ мм}$ $\zeta = 7,25 \text{ см}^2/\text{см}^3$, при этом средняя по активной зоне $\zeta = 6,5 \text{ см}^2/\text{см}^3$ при объемной доле твэлов 0,37 и теплоносителя 0,59 [1, 5]).

Существенной особенностью крестообразного твэла является также то, что накопление продуктов деления и рост объема сердечника компенсируются в основном за счет изгиба, а не растяжения оболочки, что резко снижает напряжения.

Как следует из опыта эксплуатации реактора СМ-3 [11], максимальный тепловой поток с поверхности твэлов достигает $\sim 15 \text{ МВт/м}^2$, что с учетом оцененного коэффициента запаса 1,44 дает значение локального критического потока $\geq 20 \text{ МВт/м}^2$.

Однако для получения надежных предельных значений параметров, гарантирующих безопасную работу реактора, следует учитывать как статистический характер относительного расположения твэлов в ТВС, так и технологические допуски при их изготовлении. Как отмечено в работе [18], этим в конечном счете обусловлена погрешность определения физических параметров реактора. Требования ограничения допусков на отдельные параметры обеспечиваются высокой технологией изготовления твэлов и контролем на каждой стадии всей технологической цепочки. В процессе получения топливной композиции контролируется размер крупки топлива и равномерность ее перемешивания в объеме медной шихты. При наполнении оболочки твэла топливом контролируется масса топливной композиции, загружаемая в каждый твэл.

Начальной стадией производства твэла является изготовление оболочки из нержавеющей стали 0X16H15M3B (ЭИ-847) [15]. Химический состав стали и ее свойства

(плотность 7,9—8 г/см³, удельная теплопроводность 0,145—0,2 Вт/(см·град), удельная теплосмкость 0,51—0,57 Дж/(г·град) в интервале 50—400 °С, приведены в работах [15, 19]. Заготовленную трубку прокатывают для придания ей предварительного крестообразного профиля. После приварки одной из хвостовых заглушек трубку заполняют заданным количеством бронзовой подсыпки (смесь порошка меди и бериллиевой бронзы с массовой долей бериллия 0,3%), затем загружают заданное количество топливной композиции и новую порцию подсыпки. Свойства бронзовой подсыпки близки к свойствам топливной матрицы (плотность 8,85 г/см³, удельная теплопроводность 2—2,6 Вт/(см·град), удельная теплосмкость 0,36—0,44 Дж/(г·град)) [14, 19]. Засыпанные материалы сердечника уплотняются на вибростенде. Заполненную трубку для придания ей крестообразного профиля в заданных размерах еще раз прокатывают, затем герметизируют посредством приварки второй концевой заглушки. В дальнейшем топливную композицию спекают для диффузионного сцепления с оболочкой твэла. Толщина диффузионного слоя составляет до 50 мкм. Для окончательной подгонки габаритных размеров концевые заглушки подрезают, твэлы рихтуют.

В изготовленном твэле контролируется длина топливного сердечника, равномерность распределения топлива по длине, расстояние между впадинами креста, а также качество диффузионного сцепления оболочки и топлива [13]. Погрешность в обеспечении заданной массовой доли ²³⁵U в данной партии твэлов складывается из погрешностей определения изотопного состава и массовой доли диоксида урана в топливной композиции, а также из допусков на технологический процесс наполнения твэлов.

При изготовлении контролируются основные геометрические параметры твэла и допуски на массу засыпки. Технологией изготовления предусмотрены следующие допуски на геометрические размеры твэла: на полную длину ±2 мм, на расстояние от торца твэла до границы топливного сердечника ±2 мм, на длину топливного сердечника ±10 мм, на толщину оболочки ±0,03 мм, на наружный диаметр твэла −0,1 мм. Допуски на массу загруженных в каждый твэл материалов таковы: на массу диоксида урана ±0,1 г, топливной композиции ±0,4 г, подсыпки ±2 г, на неравномерность содержания урана в загружаемой шихте < 0,02 г U/см³, на коэффициент неравномерности распределения урана по длине сердечника 1,08.

В целях определения фактических отклонений и законов статистического распределения отдельных параметров твэла ПИК были проведены экспериментальные измерения характеристик твэла четырех штатных партий по 100 штук. В процессе изготовления твэлов отклонения этих параметров лежат в пределах технологических допусков, однако их реальное распределение не контролируется. Из геометрических параметров такими являются следующие: длина активной части твэла, оболочки (трубки), концевых заглушек (см. рис. 1), весовых — масса всего твэла, оболочки, бронзовой подсыпки в концевых пробках, концевых заглушек. Поскольку заданная масса загружаемого диоксида урана технологически обеспечивается с высокой (±0,1 г/твэл) точностью, измерения параметров позволяют оценить массу медной матрицы.

В результате статистической обработки [20] экспериментальных измерений были определены средняя длина активного сердечника в твэлах $\bar{l}_{аз}$ и ее стандартное отклонение σ_e : $\bar{l}_{аз} \pm \sigma_e = 449,97 \pm 3,96$ мм. Это значение $\bar{l}_{аз}$ с хорошей точностью совпадает с заданной номинальной высотой активной зоны 500 мм, причем все твэлы по этому параметру (~ 99%) лежат внутри технологического допуска ±10 мм (почти в пределах $3\sigma_e$).

Кривые экспериментального (гистограмма) и теоретического (гауссова) распределения длины активной части сердечников твэлов $l_{аз}$, имеющие равные значения $\bar{l}_{аз}$ и σ_e , приведены на рис. 2. На рис. 3 показано распределение вероятностей попадания длины активной части сердечника твэла $l_{аз}$ в интервал $\bar{l}_{аз} - n\sigma_e \leq l_{аз} \leq \bar{l}_{аз} + n\sigma_e$. Как

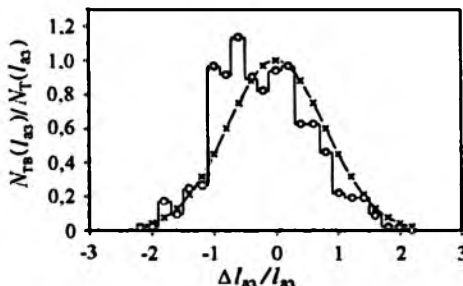
видно из рис. 2, 3, экспериментальное распределение с хорошей точностью может быть представлено гауссовым распределением с одинаковыми значениями $\bar{l}_{a3}$ и σ_e .

Как показывают результаты статистического анализа, распределение значений и всех остальных параметров твэла также с хорошей точностью может быть аппроксимировано гауссовым распределением. В качестве примера на рис. 4 приведено распределение вероятности попадания массы твэла m в интервал $\bar{m} - n\sigma_m \leq m \leq \bar{m} + n\sigma_m$, соответствующей реальному экспериментальному и теоретическому гауссову распределению твэлов при одинаковых $\bar{m}$ и σ_m .

В предположении, что твэлы в ТВС набираются произвольным образом и заданная полная длина 580 мм обеспечивается у $\sim 98-99\%$, среднее сечение топливного сердечника твэлов относительно опорной плоскости, усредненное по площади поперечного сечения активной зоны, равно заданному (чертежному) с погрешностью 0,2%.

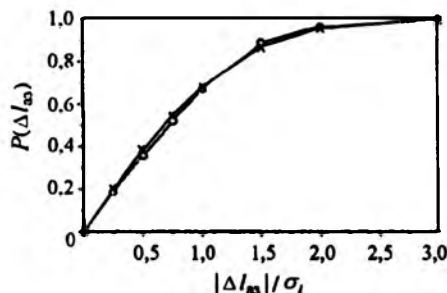
В результате анализа установлены следующие среднеквадратичные отклонения основных параметров для исследованной партии твэлов: длина топливного сердечника ± 4 мм, расстояние от торца твэла до границы топливного сердечника $\pm 1,8$ мм, средняя толщина оболочки $\pm 0,02$ мм (из данных о массе и длине оболочки), полная масса твэла $\pm 0,4$ г, масса подсыпки $\pm 0,4$ г.

Из рассмотренного следует, что выбор конструкции, материалов и изотопного состава твэла СМ и ПИК способен обеспечить высокопроизводительную, экономичную и безопасную эксплуатацию высокопоточных корпусных исследовательских реакторов. Это достигается высокой удельной концентрацией топлива, развитой удельной поверхностью теплоотдачи, большой удельной теплоемкостью и хорошей теплопроводностью топливной матрицы, высокой стойкостью оболочки к тепловым, механическим нагрузкам и эрозии. Технология изготовления твэла, его малый диаметр и обеспечивающая самодистанционирование форма позволяют легко варьировать концентрацию топлива, высоту активной зоны, размеры и форму ТВС. Результаты статистического анализа показывают, что технологический процесс изготовления твэлов и система контроля гарантированно обеспечивают диапазон раз-

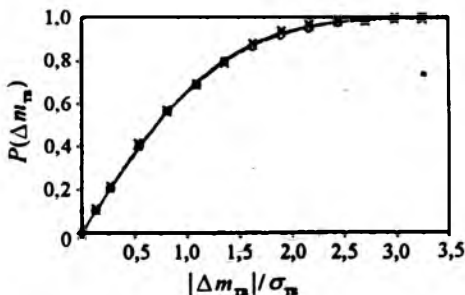


Р и с. 2. Относительное распределение числа твэлов ПИК, имеющих длину топливного сердечника l_{a3} в исследуемой выборке твэлов:

○ — статистическая обработка исследуемой партии твэлов; × — нормальное распределение числа твэлов, имеющих длину топливного сердечника с теми же значениями $\bar{l}_{a3}$ и σ_e .



Р и с. 3. Вероятность попадания длины топливного сердечника исследуемой партии твэлов ПИК l_{a3} в интервал $\bar{l}_{a3} - \Delta l_{a3} \leq l_{a3} \leq \bar{l}_{a3} + \Delta l_{a3} = P(\bar{l}_{a3} - \Delta l_{a3} \leq l_{a3} \leq \bar{l}_{a3} + \Delta l_{a3})$: ○, × — распределение вероятности для исследуемой партии твэлов и распределение вероятности для l_{a3} по нормальному закону с теми же $\bar{l}_{a3}$ и σ_e соответственно



Р и с. 4. Вероятность попадания массы твэла m исследуемой выборки $P(\bar{m} - \Delta m \leq m \leq \bar{m} + \Delta m) = P(\Delta m)$ в интервал $\bar{m} - \Delta m \leq m \leq \bar{m} + \Delta m$: ○, × — распределение вероятности для исследуемой партии твэлов и в предположении нормального распределения m с теми же $\bar{m}$ и σ_m соответственно

броса их геометрических и массовых параметров, не превышающий предела установленного допуска. Теплотехнические характеристики, экспериментально обоснованная высокая эксплуатационная надежность, универсальность в выборе параметров наряду с отлаженной технологией производства и методикой контроля делают конструкцию твэла ПИК перспективной для перехода к топливным композициям на основе алюминидных сплавов. Это позволит новой модификации твэлов ПИК стать конкурентоспособной твэлам современных высокопоточных зарубежных реакторов.

Авторы выражают благодарность А.Н. Ерыкалову и А.С. Захарову за обсуждение работы и критические замечания, Г.Ю. Михеевой — за помощь в подготовке экспериментального материала, Г.В. Самсоновой — за помощь в оформлении работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерыкалов А.Н., Колесниченко О.А., Коноплев К.А. и др. Реактор ПИК: Препринт ПИЯФ-1784, 1992. 41 с.
2. Ерыкалов А.Н., Каминкер Д.М., Коноплев К.А. и др. Реактор для физических исследований ПИК. — В сб.: Физика ядерных реакторов. Мелескес, 1966, т. 3, с. 273—280.
3. Ерыкалов А.Н., Каминкер Д.М., Коноплев К.А., Петров Ю.В. Выбор основных параметров реактора для физических исследований ПИК: Препринт ФТИ-153, 1968. 27 с.
4. Ерыкалов А.Н., Петров Ю.В. Параметры, характеризующие реакторы для физических исследований. — Атомная энергия, 1968, т. 25, вып. 1, с. 52—54.
5. Ерыкалов А.Н., Кондуров И.А., Коноплев К.А. и др. Экспериментальные возможности реактора ПИК: Препринт ЛИЯФ-852, 1983. 24 с.
6. Коноплев К.А., Назаренко В.А., Окоороков А.И. и др. Нейтронные исследования в ПИЯФ. — Атомная энергия, 1999, т. 86, вып. 5, с. 349—360.
7. Реактор ПИК. Проекты научных исследований, экспериментальных установок и оборудования. Вып. 1. Под ред. В.А. Назаренко. Гатчина, 2001. 147 с.
8. Gostev V.V., Zakharov A.S., Konoplev K.A. et al. Two design aspects connected with the safety of the PIK reactor presently under construction. — In: Proc. of the Third Meeting of the IGORR-III, 1993, Japan. AERI, Naka Ibaraki, p. 230—241.
9. Konoplev K.A. The PIK Reactor. — In: Research Report PNPI-XXX, Gatchina, 2001, p. 30—33.
10. Gostev V.V., Zakharov A.S., Konoplev K.A. et al. Critical facility «Physical model of PIK Reactor (PIK FM)». — Ibid., p. 249—254.
11. Цыканов В.А., Клинов А.В., Старков В.А. Опыт создания, реконструкции и эксплуатации высокопоточного исследовательского реактора СМ. — В сб.: Физика и техника реакторов. С.-Петербург, ПИЯФ, 2000, с. 3—16.
12. Ерыкалов А.Н. Тенденции в развитии высокопоточных реакторов для физических исследований. — Там же, 1992, с. 3—57.
13. Агеев В.И., Бек Е.Г., Волков В.С. и др. Конструкционные и физические параметры и технология изготовления твэлов реактора ПИК: Препринт ПИЯФ-2437, 2001. 32 с.
14. Бабичев А.П., Бабушкин П.А., Братковский А.М. и др. Физические величины. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
15. Бескоровый Н.М., Калинин Б.А., Платонов П.А., Чернов Н.Н. Конструкционные материалы ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1995. 704 с.
16. Быков А.А., Гагаринский А.Ю., Гладков Г.А. и др. Критические эксперименты на высокообогащенных решетках твэлов с водяным замедлителем: Препринт ИАЭ-5934/4, 1995. 56 с.
17. Гарусов Е.А., Грачев С.Д. Влияние распределения тепловыделения на неравномерность теплового потока для цилиндрических твэлов с развитой поверхностью: Препринт ЛИЯФ-1570, 1990. 15 с.
18. Гагаринский А.Ю. Критические бенчмарк-эксперименты в РНЦ «Курчатовский институт». — Атомная энергия, 1998, т. 84, вып. 6, с. 495—500.
19. Самойлов А.Г., Капганов А.И., Волков В.С. Дисперсионные твэлы. Т. 1. Материалы и технология. М.: Энергоатомиздат, 1982. 222 с.
20. Лебедев А.Н., Куприянов М.С., Недосекин Д.Д., Чернявский Б.А. Вероятностные методы в инженерных задачах. С.-Петербург: Энергоатомиздат, 2000. 333 с.