

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СООБЩЕНИЯ

---

УДК 621.039.51

## ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ТВС ВОДОГРАФИТОВОГО РЕАКТОРА

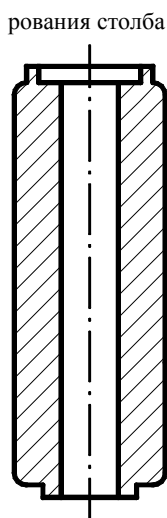
*Дмитриев А.М. (НТЦ Госатомнадзора России),  
Гаврилов П.М., Цыганов А.А., Артельный Ю.А. (Сибирский химический комбинат)*

Возрастающие требования к безопасности ядерно-энергетических установок определяют направления исследований для создания устройств, которые бы повышали внутреннюю самозащищенность реакторов. Для канальных водографитовых реакторов с положительным эффектом обезвоживания эта задача является актуальной. Применение поглотителей — бора, эрбия, гафния и гадолиния снижает обезвоживание в РБМК [1]. Гадолиний имеет высокое микроскопическое сечение поглощения нейтронов в тепловой области, поэтому, как правило, применяется в малой концентрации в качестве выгорающего поглотителя для компенсации выгорания топлива в течение кампании. Эффект обезвоживания в уран-графитовых реакторах при этом изменяется слабо. В отличие от гадолиния эрбий имеет сильный резонанс в тепловой области ( $\sim 0,5$  эВ). При обезвоживании активной зоны в этом случае спектр тепловых нейтронов становится высокоэнергетическим и за счет этого резонансное поглощение эрбием тепловых нейтронов заметно возрастает. Торий имеет небольшое сечение радиационного захвата в тепловой области, поэтому уменьшение эффекта обезвоживания при его использовании в качестве поглотителя достигается за счет увеличения концентрации и гетерогенного размещения в ТВС.

Преимущество применения тория в качестве поглотителя состоит в уменьшении эффекта обезвоживания и таком воспроизводстве ядерного топлива, которое поддерживает требуемый запас реактивности в течение кампании. ТВС включает в себя втулочные твэлы с двусторонним охлаждением и размещенные в центральной полости пэлы, содержащие торий. Они могут быть выполнены либо в виде коротких стержней, жестко закрепленных в каждом твэле, либо в виде сплошного длинного стержня [2, 3]. Конструкция ТВС с пэлами в виде короткого стержня упрощает ее загрузку и выгрузку из реактора. Наличие длинного стержня увеличивает число степеней свободы в части обеспечения критичности и ядерной безопасности реактора. Для исключения касания пэлами внутренней поверхности твэла ТВС может иметь дистанционирующие вставки или ребра. При создании такой конструкции ТВС необходима нейтронно-физическая и теплогидравлическая оптимизация.

Цель оптимизации состоит в определении геометрических размеров и таких характеристик ТВС, которые поддерживали бы требуемый запас реактивности и глубину подкритичности в течение кампании, а также обеспечивали получение отрицательного эффекта обезвоживания. Цель настоящей статьи состоит в оценке теплогидравлических параметров для достижения надежного и эффективного теплоотвода от элементов ТВС в нормальных условиях эксплуатации и меньшего коэффициента гидравлического сопротивления внутреннего кольцевого зазора пэл—втулочный твэл в сравнении с внешним кольцевым зазором твэл—канал, для того чтобы при аварии с потерей теплоносителя происходило быстрое обезвоживание внутреннего кольцевого зазора. Необходимость быстрого обезвоживания внутреннего зазора обусловлена тем, что при этом возрастает эффективность пэлов и уменьшается эффект обезвоживания.

Нами экспериментальным путем были определены гидравлические характеристики канала, нагруженного имитаторами втулочных твэлов и пэлов, и предложена оптимальная конструкция ТВС. Имитаторы твэлов имели следующие размеры: наружный диаметр составлял 36,78 мм, диаметр центрального отверстия 12,8, 14 и 16,2 мм, на их торцах имеются выступы, предназначенные для центри-



Р и с. 1. Конструкция имитатора втулочно-го твэла

рования столба твэлов в трубе технологического канала (рис. 1). В качестве имитаторов пэлов использовали цилиндрические трубки внешним диаметром 8,06 и 10,03 мм. Пэлы устанавливали в центральную полость твэлов, обеспечивая необходимый водяной зазор для их охлаждения изнутри. Для исследования гидравлики технологического канала, загруженного имитаторами твэлов и пэлов, разработан и введен в эксплуатацию экспериментальный стенд (рис. 2). Его монтировали в стволе технологической шахты. Несущей конструкцией является швеллер, на котором закреплены хомут и стойка коллектора. Стойка коллектора через клапанную коробку соединена со стойкой загрузочного механизма. Труба канала прикреплена к стойке загрузочного механизма с помощью соединительной трубы через ниппельное соединение.

Технологический канал в поперечном сечении представляет собой цилиндрическую трубу внутренним диаметром 41,33 мм, на внутренней поверхности расположены пять продольных ребер, каждое из них в поперечном сечении представляет собой равнобедренный треугольник площадью 2,4 мм<sup>2</sup>, высотой 1,35 мм. Для определения гидравлических параметров в стенд под давлением подавали воду. Плавное регулирование расхода воды осуществляли с помощью дросселя, установленного в клапанной коробке. Расход воды определяли с помощью мембранного расходомера с вертикальной профильной шкалой и сигнальным устройством ДМ-997-М. Допустимая погрешность прибора не превышает  $\pm 2,5\%$  максимального значения шкалы (12 м<sup>3</sup>/ч) по перепаду в пределах рабочей части. Давление на входе в технологический канал определяли на стойке шарового крана с помощью образцового манометра с максимальной шкалой 1,6 МПа (класс точности 0,4). В трубе технологического канала на расстоянии 860 мм от низа установлен обтекатель, предназначенный для уменьшения выходного сопротивления. Длина соединительной трубы 400 мм. Полная длина трубы канала от нижнего торца до верха корпуса загрузочного механизма в сборе составляла 13 935 мм.

На стенде проведена серия экспериментов в целях определения коэффициента гидравлического трения по внешнему и внутреннему каналам, образованным системами канал—наружная поверхность твэла и пэл—внутренняя поверхность твэла. Исследовали два типа загрузки (рис. 3):

загрузка 50 имитаторов твэлов без центрального отверстия (шесть экспериментов);

загрузка 50 имитаторов твэлов внутренним диаметром 12,8, 14, 16,2 мм и поочередной установкой пэлов наружным диаметром 8,06, 10,03 мм в центральную полость твэлов (по три серии экспериментов с погрешностью не более 3%).

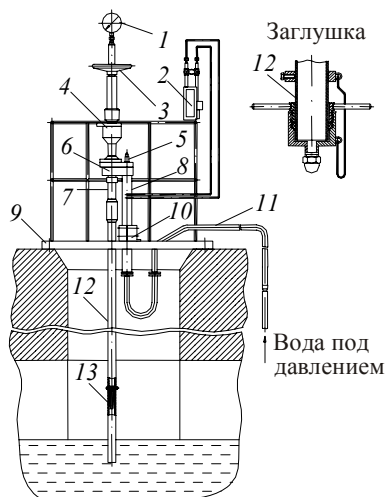
Во избежание деформации пэлов при установке в центральную полость загруженных имитаторов твэлов на последний устанавливали заходную втулку. Установка заглушки на нижнем конце трубы канала позволяла загружать имитаторы в стенд при наличии в нем воды. Критерием, ограничивающим расход воды через экспериментальный стенд, являлся предел по давлению 1,6 МПа на входе в систему. Разгрузку канала осуществляли вручную во избежание изменения геометрии имитаторов твэлов. Глубина, на которую конец трубы был погружен в воду, составляла 475 мм.

Гидравлические параметры канала определяли следующим образом: изменяя расход дросселем, снимали показания расхода и давления на входе в стенд (рис. 4). При снятии гидравлических параметров температуру воды поддерживали в пределах 45—45,5 °С.

Потери давления на загрузке определяли по формуле

$$\Delta P_i = (\Delta P_1)_i + (\Delta P_2)_i - (\Delta P_3)_i - (\Delta P_4)_i,$$

где  $(\Delta P_1)_i = (P_m)_i$  — потери давления на загрузке, каналах и местных участках сопротивления, Па;  $(\Delta P_2)_i = (L_v)_i \rho_i \cdot 10^{-2}$  —



Р и с. 2. Экспериментальный стенд: 1 — манометр; 2 — расходомер; 3 — герметичный колпак; 4 — стойка загрузочного механизма; 5 — дросселирующее устройство; 6 — клапанная коробка; 7 — соединительная труба; 8 — стойка верхнего группового коллектора; 9 — швеллер; 10 — хомут; 11 — труба размером 38/2 мм; 12 — труба технологического канала; 13 — обтекатель

гидростатический напор, Па;  $L_v$  — расстояние от манометра до уровня воды в шахте на сбросе, мм;  $10^{-2}$  — коэффициент;  $(\Delta P_3)_i = (\Delta P_T)_i = (1,456 \cdot 10^{-2} \pm 0,5\%) Q_i^2 L_T$  — потери давления, обусловленные трением на участке  $L_T$ , Па;  $L_T$  — суммарная длина трубы канала, не участвующая в загрузке: от верха канала до верха загрузки и от низа загрузки до уровня воды в шахте на сбросе, мм;  $(\Delta P_4)_i = (\Delta P_{м.с})_i$  — потери давления на местных участках, Па. Для имитаторов твэлов без центрального отверстия экспериментально определены потери давления на обтекатель и местных участках в результате резкого сужения и расширения канала в верхней и нижней точках загрузки:  $(\Delta P_{м.с})_i = (1,741 \cdot 10^3 \pm 0,3\%) Q_i^2$ . Для имитаторов твэлов с установкой пэлов были экспериментально определены потери давления на обтекатель, местных участках (на втулке, в нижней точке загрузки в результате увеличения проходного сечения канала) и пэлах до входа в загрузку:

$(\Delta P_{м.с})_i = (1,011 \cdot 10^3 \pm 0,7\%) Q_i^2$  — с установкой пэла диаметром 8,06 мм;

$(\Delta P_{м.с})_i = (1,177 \cdot 10^3 \pm 0,9\%) Q_i^2$  — с установкой пэла диаметром 10,03 мм.

Коэффициент гидравлического трения для внешнего кольцевого канала, образованного внутренней поверхностью трубы канала и внешней поверхностью загруженных имитаторов твэлов без центрального отверстия, определяли по формуле Вейсбаха—Дарси [4].

В зависимости, приведенной на рис. 5, можно выделить три зоны:  $Re \leq 30\,000$  — область, внутри которой происходит переход из ламинарного режима течения в турбулентный;  $30\,000 > Re > 78\,000$  — промежуточная область;  $Re \geq 78\,000$  — область квадратичного сопротивления.

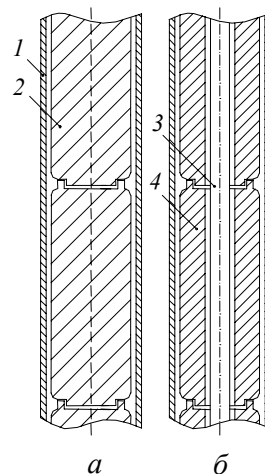
Во второй области наблюдается плавное снижение коэффициента гидравлического трения с его последующим ростом и выходом на стационарное значение ( $Re \approx 78\,000$ ), что можно объяснить тем, что поверхность имитаторов твэлов имеет равномерно распределенную однозернистую шероховатость [4]. Погрешность измерений не превышает 3,5%. Для определения коэффициента гидравлического трения кольцевого канала, образованного пэлами и внутренней поверхностью имитаторов твэлов, рассмотрим систему канал—имитаторы твэлов—стержень как систему двух кольцевых каналов, соединенных параллельно. Естественно, что в такой системе потери напора во всех каналах, соединенных параллельно, одинаковы:

$$\begin{cases} \Delta P_i^1 = \Delta P_i^2; \\ Q_i = Q_i^1 + Q_i^2, \end{cases} \quad (1)$$

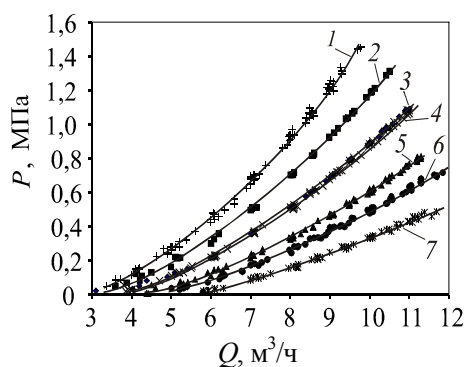
где для внешнего кольцевого канала используется индекс 1, для внутреннего канала индекс 2.

С использованием экспериментальных данных для загрузок имитаторов твэлов с центральным отверстием и пэлов расход по внешнему кольцевому каналу определяли по формуле Вейсбаха—Дарси [4], по внутреннему — путем решения системы уравнений (1).

На рис. 6 представлены зависимости  $\lambda(Re)$ , аппроксимированные полиномом 3-й степени для различ-

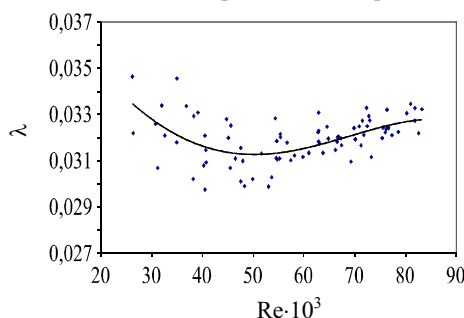


Р и с. 3. Загрузка имитаторов твэлов (а) и имитаторов твэлов с центральным отверстием и пэлом (б): 1 — труба канала; 2 — имитатор твэлов без центрального отверстия; 3 — поглощающий стержень; 4 — имитатор твэлов с центральным отверстием

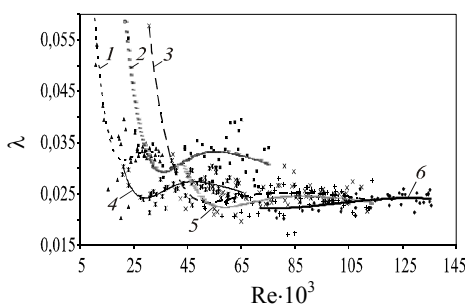


Р и с. 4. Зависимость давления на входе в канал от расхода воды для всех вариантов загрузки: 1 — наружный диаметр имитатора твэла 36,78 мм, центральное отверстие отсутствует, без пэла; 2 — наружный диаметр имитатора твэла 36,78 мм, центрального отверстия 12,8 мм, внешний диаметр пэла 10,03 мм; 3 — 36,78, 12,8, 8,06 мм соответственно; 4 — 36,78, 14, 10,03 мм соответственно; 5 — 36,78, 14, 8,06 мм соответственно; 6 — 36,78, 16,02, 10,03 мм соответственно; 7 — 36,78, 16,2, 8,06 мм соответственно

ных видов ТВС. Погрешность измерений не превышает 3,5%.



Р и с. 5. Зависимость коэффициента гидравлического трения от числа Рейнольдса для канала, загруженного имитаторами твэлов без центрального отверстия



Р и с. 6. Зависимость коэффициента гидравлического трения от числа Рейнольдса для различных конфигураций ТВС: 1 — наружный диаметр имитатора твэла 36,78 мм, центрального отверстия 12,8 мм; 2 — внешний диаметр пэла 10,03 мм; 36,78, 12,8, 8,06 мм соответственно; 3 — 36,78, 14, 8,06 мм соответственно; 4 — 36,78, 14, 10,03 мм соответственно; 5 — 36,78, 16,2, 10,03 мм соответственно; 6 — 36,78, 16,02, 8,06 мм соответственно

в сравнении с внешним кольцевым зазором твэл—канал уменьшить эффект обезвоживания при авариях, связанных с потерей теплоносителя.

С точки зрения стабильности коэффициента гидравлического сопротивления трения оптимальной является конфигурация ТВС из твэлов внутренним диаметром 16,2 мм с пэлом диаметром 8,06 мм. Для обеспечения необходимого давления на входе в реактор и во всасывающем трубопроводе циркуляционных насосов первого контура необходимо разработать дополнительные технические средства, не предусмотренные проектом реакторной установки, что представляется нецелесообразным. Поэтому оптимальной является ТВС из твэлов внутренним диаметром 14 мм с пэлом диаметром 10,03 мм. Использование данной ТВС позволит регулировать расход в каналах в больших пределах, эксплуатационные параметры первого контура изменятся незначительно. За счет меньшего коэффициента гидравлического сопротивления внутреннего кольцевого зазора пэл—твэл по сравнению с внешним кольцевым зазором, малого внутреннего объема теплоносителя и большой внутренней поверхности теплоотдачи по сравнению с другими конфигурациями ТВС обеспечивается быстрое обезвоживание внутреннего кольцевого зазора относительно внешнего и, как следствие, достигается максимальная эффективность пэла и снижается эффект обезвоживания реактора. Расход теплоносителя

При достижении числа Рейнольдса, соответствующего скорости в точке максимума, на коэффициент гидравлического трения начинает оказывать влияние наличие эксцентриситета пэла, ограниченного размерами дистанционирующей вставки или ребер [5]. С увеличением числа Рейнольдса снижается коэффициент гидравлического сопротивления трения. Темп его изменения обратно пропорционален гидравлическому диаметру внутреннего проходного сечения ТВС (см. таблицу).

**Зависимость коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  от диаметра внутреннего проходного сечения ТВС при наличии эксцентриситета пэла**

| Тип ТВС    | $d_r$ , мм | $\Delta\lambda/\Delta Re$ |
|------------|------------|---------------------------|
| 12,8/8,06* | 4,74       | $1,4 \cdot 10^{-7}$       |
| 12,8/10,03 | 2,77       | $4,0 \cdot 10^{-7}$       |
| 14,0/8,06  | 5,94       | $8,1 \cdot 10^{-8}$       |
| 14,0/10,03 | 3,97       | $1,5 \cdot 10^{-7}$       |
| 16,2/8,06  | 8,14       | $6,5 \cdot 10^{-9}$       |
| 16,2/10,03 | 6,17       | $3,3 \cdot 10^{-8}$       |

\* Внутренний кольцевой канал, образованный пэлом диаметром 8,06 мм и центральным отверстием твэла диаметром 12,8 мм.

Таким образом, на основании экспериментальных данных были рассчитаны гидравлические параметры различных конфигураций ТВС (см. рис. 6). Любая ТВС, состоящая из втулочных твэлов с размещенным в центре стержнем-поглотителем на основе тория, позволяет за счет меньшего коэффициента гидравлического сопротивления внутреннего кольцевого зазора пэл—твэл

ля во внутреннем кольцевом зазоре обеспечит надежный теплоотвод от пэла при эксплуатации установки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосов А.М. Влияние выгорающих поглотителей на эффект обезвоживания РБМК. — Атомная энергия, 1993, т. 75, вып. 1, с. 67—69.
2. Дмитриев А.М., Цыганов А.А., Гаврилов П.М. и др. Топливная сборка ядерного реактора. Патент РФ № 2100851 от 27.12.1997. — Бюл. «Изобретения», 1997, № 36, с. 430.
3. Цыганов А.А., Дмитриев А.М., Гаврилов П.М. и др. Топливная сборка ядерного реактора. Патент РФ № 2120672 от 20.10.1998. — Там же, 1998, № 29, с. 418.
4. Чугаев Р.Р. Гидравлика. Л.: Энергия, 1975. 600 с.
5. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

Поступило 22.07.05

В окончательной редакции 1.08.06

УДК 539.171; 620.186; 621.039

## ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ОТ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ НАНОДИСПЕРСНОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ

*Артемов В.А. (НИИ технологии материалов)*

В настоящей статье оцениваются зависимости критических параметров низкотемпературного теплового ядерного реактора и поглощения нейтронов от размера частиц нанодисперсного материала (замедлителя).

Используется модель, рассмотренная в работах [1—3]. Материалом активной зоны является однородная твердая смесь двух веществ — делящегося вещества, например,  $^{235}\text{U}$  и углерода. Делящееся вещество — мелкодисперсный порошок с размером частиц  $\sim 10\text{—}10^2$  мкм (микровзвесь [4]), замедлитель — нанодисперсный порошок углерода из одинаковых круглых частиц радиусом  $a$ , коэффициент разбавления делящегося вещества  $\sim 10^{-6}$ , среднее расстояние между микровзвездами  $\sim 1$  см. Обозначим  $\gamma$  долю общего объема активной зоны, занятой веществом,  $\alpha$  — долю объема вещества, занимаемого замедлителем. Ограничимся диффузионным приближением моноэнергетического теплового реактора, энергия тепловых (термализованных) нейтронов равна  $1,5k_{\text{B}}T$ , где  $k_{\text{B}}$  — постоянная Больцмана;  $T$  — температура замедлителя. Критическая масса делящегося вещества  $M = (4\pi/3)\rho R_c^3$ , критический радиус реактора  $R_c = \pi/\kappa$  (реактор в форме шара без отражателя), материальный параметр размножающей среды  $\kappa = [(k_{\infty} - 1)\Sigma_c/D]^{1/2}$ , где  $k_{\infty}$  — коэффициент размножения для неограниченной размножающей среды;  $D = (3\Sigma_{tr})^{-1}$ ,  $\Sigma_{tr}$ ,  $\Sigma_c$  — коэффициент диффузии, транспортное макроскопическое сечение, макроскопическое сечение поглощения нейтронов соответственно;  $\rho$  — плотность делящегося вещества в активной зоне [5]. Зависимость критических параметров реактора  $M$  и  $R_c$  от размера частиц  $a$  замедлителя обусловлена параметрической зависимостью транспортного сечения  $\Sigma_{tr}$  от величины  $a$ .

Для теплового реактора, используя приближение эффективного потенциала  $V_0 \sim 10^{-7}$  эВ для взаимодействия нейтронов с частицами замедлителя, при  $ka \gg 1$  имеем  $\Sigma_{tr} = \gamma\alpha n_C \sigma_s^{(C)}(1 - 2/3A) + 1,5\pi\gamma\alpha a^{-1}k^4 n_C^2 \sigma_s^{(C)} [\ln(4ka) - 0,42]$ . Здесь  $\sigma_s^{(C)}$  — сечение когерентного рассеяния нейтрона на связанном ядре углерода;  $A = 12$  — атомное число углерода;  $k$ ,  $m$  — волновой вектор и масса нейтрона соответственно;  $\hbar^2 k^2/m = 3k_{\text{B}}T$ ;  $n_C$  — концентрация атомов углерода в частице. С уменьшением размера  $a$  частиц замедлителя транспортное сечение  $\Sigma_{tr}$  возрастает. При  $ka \ll 1$  имеем  $\Sigma_{tr} = \gamma\alpha n_C \sigma_s^{(C)}(1 - 2/3A) + (4/3)\pi\gamma\alpha a^3 n_C^2 \sigma_s^{(C)}$ . С увеличением размера  $a$  частиц замедлителя транспортное сечение возрастает. Поэтому для каждой определенной температуры реактора существует оптимальный размер частиц замедлителя  $a_{\text{опт}}$ , при котором достигается максимум транспортного сечения  $\Sigma_{tr}$ .

Парциальный вклад когерентного рассеяния нейтронов на частицах замедлителя в полное рассеяние нейтронов в активной зоне возрастает при уменьшении размера частиц только при  $a > a_{\text{опт}}$ . При этом критические масса и радиус реактора уменьшаются. Уменьшение размера частиц при