

УДК 621.039.53

К проекту реконструкции активной зоны реактора ВВР-М

ВЕРХОВЫХ П. М., ЗВЕЗДИН В. С., КИРСАНОВ Г. А., КОЛОСОВ К. А., КОНОПЛЕВ К. А., САЙКОВ Ю. П., СУХОВЕЙ В. Н., ЧЕРНОВА Т. А., ШИШКИНАЦЖ. А.

Наибольшие резервы повышения мощности реактора ВВР-М заключены в развитии теплоотдающей поверхности твэлов, приходящейся на единицу объема активной зоны. Это может быть достигнуто путем уменьшения толщины твэлов и гидравлического диаметра каналов тепловыделяющих сборок (ТВС), что при сохранении потери давления на активной зоне влечет за собой ухудшение условий теплоотдачи. Увеличение мощности реактора в этом случае не будет пропорционально увеличению теплоотдающей поверхности твэлов, поэтому для определения резервов требуется учет всех факторов, связанных с геометрическими параметрами ТВС.

Считая, что активная зона реактора состоит из параллельных пластин толщиной a и высотой l , расположенных на расстоянии b друг от друга, оптимизационную задачу можно свести к нахождению геометрических параметров ТВС, отвечающих максимуму функционала

$$\bar{q}_0 = \frac{2q_0}{(a+b)l} \int_0^l f(z) dz, \quad (1)$$

представляющего собой усредненную по высоте объемную плотность энерговыделения в самом теплонапряженном канале. Здесь q_0 — максимально допустимая плотность теплового потока; $f(z)$ — известная функция распределения энерговыделения по высоте активной зоны.

Максимально допустимая плотность теплового потока в реакторе может быть определена из условий безопасности его эксплуатации. Например, минимальная разность между температурой насыщения t_s и температурой оболочки твэла t_w должна быть не менее неко-

торой заданной величины Δt :

$$(t_s - t_w)_{\min} \geq \Delta t. \quad (2)$$

В общем случае разность $t_s(z) - t_w(z)$ в самом теплонапряженном канале является функцией продольной координаты z , и если минимум этой разности имеет место в сечении с координатой $z = z_0$, то из условия (2) и условия существования экстремума получаем следующие уравнения:

$$\Delta t = t_s(z) \Big|_{z=z_0} - t_e - \frac{2q_0}{V\rho c b} \int_0^{z_0} f(z) dz - \frac{q_0 f(z) \Big|_{z=z_0}}{\alpha}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial t_s(z)}{\partial z} \Big|_{z=z_0} - \frac{2q_0}{V\rho c b} f(z) \Big|_{z=z_0} - \frac{q_0}{\alpha} \frac{\partial f(z)}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = 0. \quad (4)$$

где t_e — температура теплоносителя на входе в активную зону; V — скорость теплоносителя в каналах ТВС; ρ и c — плотность и теплоемкость теплоносителя соответственно; α — коэффициент теплоотдачи.

Уравнения (3) и (4) позволяют определить координату опасного сечения z_0 и максимальный тепловой поток q_0 .

Скорость теплоносителя определялась из уравнения потери давления на активной зоне

$$\Delta P_{AZ} = \frac{\rho V^2}{2} \left[\xi_{вх} + \xi_{тр} l/2b + \xi_{вых} + \xi_{реш} \frac{1}{(1+a/b)^2} \right],$$

где ΔP_{AZ} — потери давления в активной зоне; $\xi_{вх}$ и $\xi_{вых}$ — коэффициенты местных сопротивлений входа и выхода ТВС соответственно; $\xi_{тр}$ и $\xi_{реш}$ — коэффициенты сопротивления трения и решеток реактора.

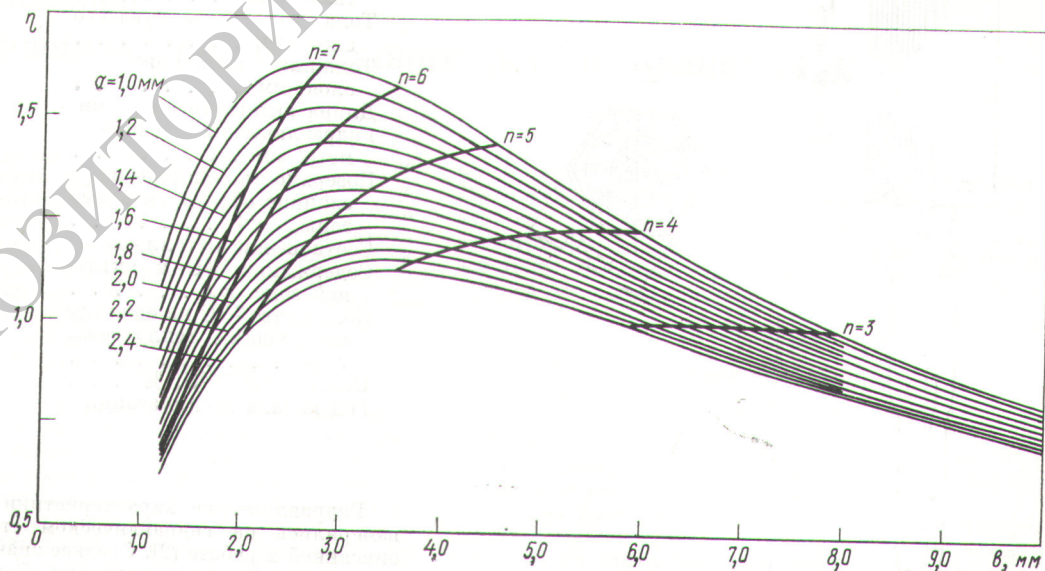


Рис. 1. Зависимость относительного увеличения мощности реактора ВВР-М η от величины зазора между твэлами b при разной толщине твэлов a

Зависимость $t_s(z)$ определялась по известной зависимости температуры насыщения от давления, зависящего от координаты $t_s[P(z)]$, где

$$P(z) = P_0 + \rho g (H_0 + z) - \frac{\rho V^2}{2} (\xi_{вх} + \xi_{тр} z/2b + 1).$$

Здесь g — ускорение свободного падения; P_0 — атмосферное давление; H_0 — глубина бассейна реактора. Решение уравнений (3) и (4) и определение q_v по уравнению (1) проводилось на ЭВМ.

Поскольку функциональные зависимости для тепловых и гидравлических процессов в кольцевых зазорах и плоскопараллельных щелях одинаковы, результаты расчетов, выполненных для плоских твэлов, справедливы для твэлов реактора ВВР-М трубной конструкции.

На рис. 1 представлена зависимость относительного увеличения мощности реактора ВВР-М от геометрических параметров твэлов:

$$\eta = \bar{q}_v / \bar{q}_{v0},$$

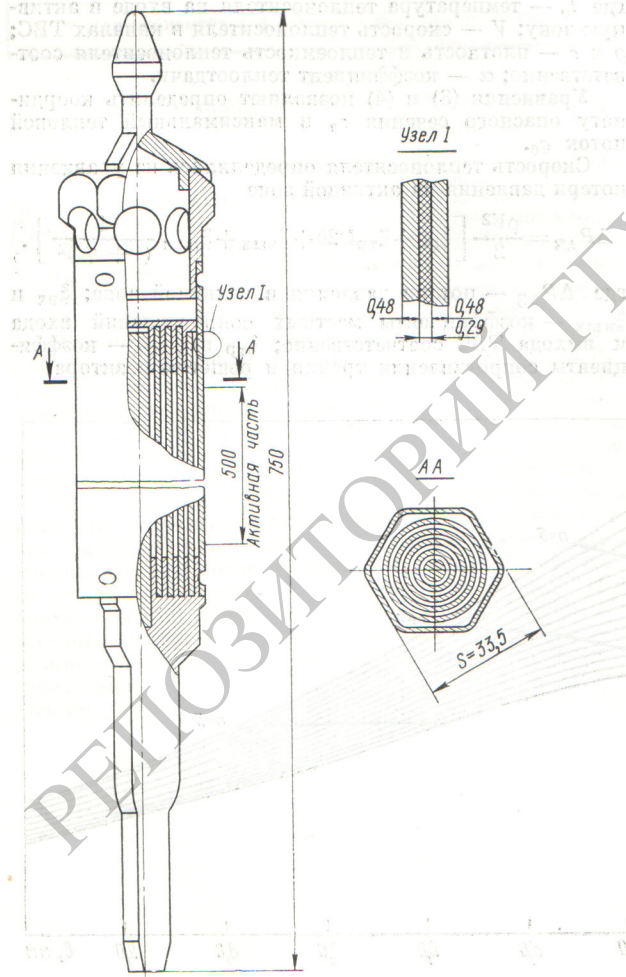


Рис. 2. Тепловыделяющая сборка типа ВР-М 3

где q_{v0} — усредненная по высоте в самом теплонапряженном канале объемная плотность энерговыделения для ТВС типа ВВР-М2 [1], используемых в настоящее время в реакторе ВВР-М.

Расчеты выполнены для температуры воды на входе в активную зону, равной 50 °С, при отсутствии разрежения под решетками реактора и в предположении, что максимальная температура стенки твэла равна температуре насыщения воды.

Из всего многообразия сочетаний толщин трубок и зазоров между ними для реактора ВВР-М можно выбрать только те, которые обеспечивают сохранение размеров элементарной ячейки активной зоны, определяемой конструкцией отражателя и шагом решеток реактора. При этом условии для заданного количества трубок в сборке зависимость между толщиной трубки и зазором однозначно определяется из геометрических соображений. На рис. 1 нанесены линии, соответствующие твэлам с различным количеством коаксиальных трубок в сборке (n).

Из рис. 1 следует, что наибольший выигрыш в мощности реактора дают шеститрубные ТВС с толщиной твэла 1,2—1,4 мм. Поэтому были созданы новые шестиэлементные сборки типа ВВР-М3 (рис. 2) и ВВР-М4, состоящие из наружного твэла — шестигранной трубки с размером под ключ 33,5 мм; четырех трубных твэлов наружными диаметрами 11,1; 16,7; 22,3; 27,9 мм и центрального стерженькового твэла диаметром 5,5 мм. Диаметр топлива в стержне 1,8 мм.

Сборка типа ВВР-М4 отличается от ВВР-М3 только наличием разрыва топлива в средней части твэлов на длине 100 мм для увеличения плотности потока тепловых нейтронов в районе отдельных горизонтальных каналов. В качестве топлива используется уран-алюминиевый сплав с массовым содержанием урана 23,5%. Материал оболочки — алюминиевый сплав САВ-1. Ниже приведены некоторые сравнительные характеристики ТВС типа ВВР-М2 и ВВР-М3 соответственно.

Толщина стенки трубных твэлов, мм	2,5; 1,25
Толщина плакирующего слоя, мм	0,9; 0,48
Толщина активного слоя, мм	0,7; 0,29
Длина активного слоя, мм	500; 500
Гидравлический диаметр, мм	6; 3,1
Поверхность теплосъема в единице объема активной зоны, см ⁻¹	3,62; 6,6
Соотношение металл—вода	0,816; 0,728
Содержание ²³⁵ U в активной зоне, г/л	61,2; 67,9
Количество ²³⁵ U на единицу поверхности теплосъема, г/м ²	166; 103
Обогащение ²³⁵ U, %	36; 90
Год начала эксплуатации	1963; 1972
	(опытная партия)

Гидравлические характеристики ТВС типа ВВР-М3 измерялись на гидравлическом стенде по методике, описанной в работе [2]. Среднее значение коэффициента гидравлического сопротивления сборки новых ТВС при скорости воды 2,5—3,0 м/с составляет $6,85 \pm 0,10$,

что в 1,57 раза превосходит коэффициент сопротивления сборки ТВС типа ВВР-М2 [2].

Тепловые расчеты, основанные на экспериментальных результатах, подтверждают возможность реконструкции реактора ВВР-М с повышением его мощности до 30 МВт при использовании новых ТВС и увеличении мощности теплообменников и градирни, а также показывают возможность постановки новых ТВС в активную зону реактора наряду с ТВС типа ВВР-М2.

Работоспособность новых, в особенности тонкостенных, твэлов определяется в первую очередь герметичностью оболочки. Для твэлов ВВР-М2 вклад поверхностного загрязнения в активность теплоносителя пренебрежимо мал (~3%), что соответствует эквивалентному содержанию ^{235}U на поверхности $(3 \pm 1) \cdot 10^{-10}$ г/см² [3]. Рост обогащения ^{235}U в новых твэлах в 2,5 раза и увеличение поверхности в 1,77 раза повышает вклад поверхностного загрязнения в четыре раза по сравнению с твэлами ВВР-М2. Эквивалентное содержание ^{235}U на поверхности новых твэлов было определено по скорости поступления осколков в теплоноситель петлевого канала из твэлов с нулевым выгоранием и составило $(7 \pm 2) \cdot 10^{-10}$ г/см².

Основной вклад в осколочную активность теплоносителя дает ухудшение герметичности твэлов в ходе выгорания. Опытной эксплуатации были подвергнуты три партии твэлов, изготовленных в разное время. Твэлы ВВР-М3 и ВВР-М4 эксплуатировались в активной зоне реактора ВВР-М наряду с твэлами ВВР-М2 при мощности реактора 16 МВт. Всего в зону загружалось 19 ТВС.

Анализ данных систематического контроля герметичности твэлов в активной зоне реактора за весь период эксплуатации новых твэлов показал, что при загрузке в активную зону сборок ВВР-М3 и ВВР-М4 в количестве 8,7% полного числа сборок осколочная активность теплоносителя не увеличивалась, а сохранялась на обычном уровне (10^{-6} Ки/л по ^{85m}Kr , ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{135}Xe , ^{138}Xe) в диапазоне выгорания топлива в новых твэлах

от 0 до 70%. Определив негерметичность β как отношение скорости утечки осколков к скорости их образования, можно оценить ее верхние пределы для новых твэлов, учитывая скорость поступления осколков в теплоноситель реактора в момент нахождения максимального количества новых твэлов в активной зоне и ошибок измерения этой скорости (2σ).

По изотопам йода при негерметичности только одной сборки и одинаковой негерметичности всех сборок $\beta = 40 \cdot 10^{-7}$ и $2 \cdot 10^{-7}$ соответственно. На четырех сборках было прослежено изменение негерметичности в ходе выгорания путем периодического извлечения их из активной зоны и испытания в петлевом канале. Результаты позволили убедиться в том, что негерметичность новых твэлов находится на том же уровне, что и твэлов ВВР-М2.

Опытная эксплуатация твэлов ВВР-М3 и ВВР-М4 в реакторе подтвердила их высокую работоспособность вплоть до максимально достигнутого выгорания 78%, что соответствует плотности делений в объеме топливной композиции $1,45 \cdot 10^{21}$ см⁻³. Успешные реакторные испытания создают реальную основу для модернизации реактора ВВР-М с использованием новых твэлов и повышения его мощности до 30 МВт.

Авторы благодарят Д. М. Каминкера за постоянную поддержку, а также Ю. П. Семенова и Б. С. Разова за большую помощь в проведении этой работы.

Поступило в Редакцию 20/VI 1975 г.
В окончательной редакции 29/III 1976 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каминкер Д. М., Коноплев К. А. III Женевск. конф., 1964, докл. № 325.
2. Кирсанов Г. А. и др. «Атомная энергия», 1975, т. 39, вып. 5, с. 320.
3. Баданина Н. Г., Коноплев К. А., Сайков Ю. П. «Атомная энергия», 1972, т. 32, вып. 4, с. 346.

УДК 621.039.562:621.039.512.45

Анализ релейных систем зонного регулирования реактора

Филипчук Е. В., Небоян В. Т., Потапенко П. Т.

В системах автоматического регулирования распределения мощности в активной зоне могут быть использованы преимущественно сервоприводы постоянной скорости. Регулирование скорости обычно затруднено тем обстоятельством, что при перемещении стержня вверх привод работает в принципиально другом режиме, чем при движении стержня вниз. Например, все стержни реактора РБМК имеют привод постоянной скорости. Таким образом, техническая реализация регулирования приводит к созданию многомерных релейных систем.

В настоящей статье излагается инженерная методика расчета таких систем по заданным показателям качества для реакторов с устойчивым распределением мощности. Система состоит из n идентичных релейных регуляторов, равномерно расположенных в области активной зоны с выравненным распределением мощности (в зоне управления). Датчики и регулирующие стержни локальных регуляторов размещаются в окрестностях узлов квадратной или треугольной решетки.

В соответствии с адиабатическим приближением [1] связь вектора отклонений нейтронного потока от заданных значений (уставок) $\mathbf{n} = (n_1, n_2, \dots, n_m)^T$, регистрируемого датчиками, с вектором внешних воздействий, вносимых стержнями, $\Delta \mathbf{k} = (\Delta k_1, \Delta k_2, \dots, \Delta k_m)^T$ устанавливается уравнением

$$\mathbf{n} = H(p) \Delta \mathbf{k}, \quad (1)$$

где $H(p)$ — передаточная матрица реактора:

$$H(p) = W_0(p) A. \quad (2)$$

Передаточная функция точечного реактора $W_0(p)$ и статическая матрица A определяются экспериментально или расчетным путем.

Анализ системы в режиме стабилизации распределения мощности существенно упрощается с учетом ограниченного взаимодействия релейных локальных регуляторов. В соответствии с этим предполагается, что локальные возмущения по реактивности, создаваемые,