

УДК 621.039.562

Эксперименты по газовому управлению реактором

ЕМЕЛЬЯНОВ И. Я., ФИЛИПЧУК Е. В., ПОТАПЕНКО П. Т.,
ФЕДУЛОВ В. В., ПОТАПЕНКО Г. Т., СИВОКОНЬ В. П.

Применение газообразных поглотителей нейтронов для управления реактором [1] позволяет решать весьма важную техническую задачу оптимального управления энерго-распределением по объему активной зоны [2, 3]. В настоящей работе приведены основные результаты исследований, выполненных на реакторе ИРТ-2000 в целях изучения возможностей управления аксиальным нейтронным потоком реактора, проверки работоспособности газовой системы регулирования интегральной мощности.

Экспериментальная установка. Регулирующий орган представляет собой единую сборку, состоящую из трех идентичных, размещенных одна над другой по высоте герметичных секций — цилиндров из алюминиевого сплава диаметром 27×2 мм и высотой по 175 мм. Давление газа (^3He) в каждой секции изменялось автономно в пределах $(0,01 \div 2,0) \cdot 10^5$ Па подключением их с помощью соответствующего клапана к баллону высокого или низкого давления. Скорость заполнения (опорожнения) секций поглотителем при этом ограничена до безопасных пределов ламинарными дросселями. Чтобы уменьшить риск засорения дросселей, предусматриваются механические фильтры. Для измерения температуры газа в верхнюю секцию встроена термопара, рабочий спай которой находится в геометрическом центре секции.

Измерение потока тепловых нейтронов по высоте активной зоны проводилось с помощью триаксиальной камеры деления КТВ.

Результаты измерений. Для регулирующего органа была определена эффективность каждой секции в зависимости от давления газа (рис. 1). При атмосферном давлении

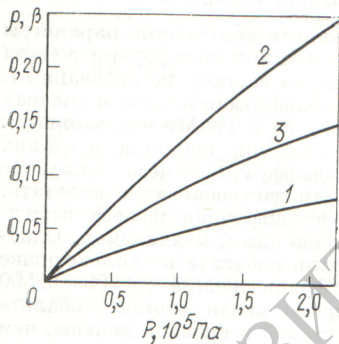
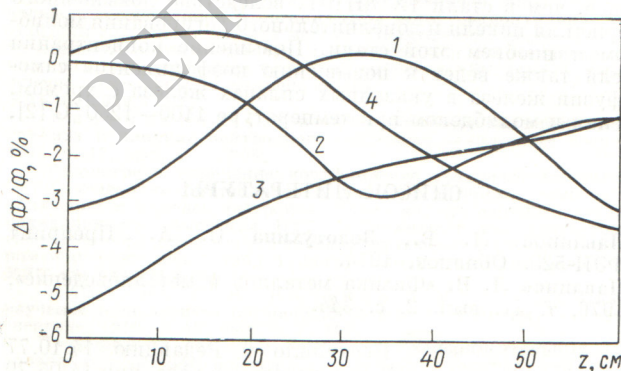


Рис. 1. Зависимость эффективности верхней (1), центральной (2) и нижней (3) секций от давления газа в них

Рис. 2. Деформация нейтронного потока по высоте активной зоны при следующих распределениях давления по секциям (нижняя, центральная и верхняя): 1 — $2,0 \cdot 10^5$; $0,02 \cdot 10^5$; $2,0 \cdot 10^5$ Па; 2 — $0,02 \cdot 10^5$; $2,0 \cdot 10^5$; $0,02 \cdot 10^5$ Па; 3 — $0,02 \cdot 10^5$; $1,0 \cdot 10^5$; $2,0 \cdot 10^5$ Па; 4 — $2,0 \cdot 10^5$; $1,0 \cdot 10^5$; $0,02 \cdot 10^5$ Па



эффективность исследуемого регулирующего органа во всех секциях приближается к эффективности равновольного стержня из стали 45, из которой выполнен стержень АР реактора.

На рис. 2 показана деформация нейтронного потока по высоте активной зоны при различных комбинациях давления газа в секциях. При измерениях камера КТВ находилась на стыке четырех кассет на расстоянии 50,6 мм от центра регулирующего органа. Компенсация реактивности при перераспределении поглотителя в секциях проводилась только стержнем АР, стержни ручного регулирования не перемещались. Максимальное отклонение нейтронного потока от невозмущенного составило $\sim 6\%$. Полученные результаты согласуются с данными работы [4].

В системе автоматического регулирования мощности реактора исполнительным органом является центральная секция экспериментальной регулирующей сборки. Клапаны питания этой секции имели электромагнитный привод и управлялись релейным блоком с промышленным регулятором типа ВРТ-2. Датчиком служила камера КТВ, размещенная в центральной по высоте части активной зоны, сигнал которой регистрировался самописцем Н-37. При отключенной штатной системе автоматического регулирования газовая система справлялась с различными возмущениями, поддерживая заданную мощность с погрешностью не более $\pm 1\%$.

Захват теплового нейтрона атомом поглотителя по реакции $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$ сопровождается выходом энергии 0,764 МэВ, выделяющейся в виде кинетической энергии вторичных продуктов. В интенсивных потоках тепловых нейтронов это приводит к заметному разогреву газа (на номинальной мощности реактора температура газа в центре секции становится выше температуры теплоносителя). Очевидно, что термопара показывает только температуру горячего спая, которая может отличаться от температуры окружающего газа. Как видно из рис. 3 (позиция 1), это отличие для давления $P = 0,01 \cdot 10^5$ Па составляет 10°C (саморазогрев газа при таком давлении заведомо ничтожно мал, а другими видами погрешностей можно пренебречь). С другой стороны, в интервале давления $(0,01 \div 2,0) \cdot 10^5$ Па и температуры 300—360 К коэффициент теплопроводности газа изменяется не более чем на 15%. Поэтому условия охлаждения горячего спая в этом интервале давления практически не изменяются и экспериментальную зависимость можно скорректировать на 10°C . Была проведена теоретическая оценка саморазогрева газа. Расхождение между экспериментальными и расчетными значениями температуры составило 6—8 $^\circ\text{C}$ и обусловлено инструменталь-

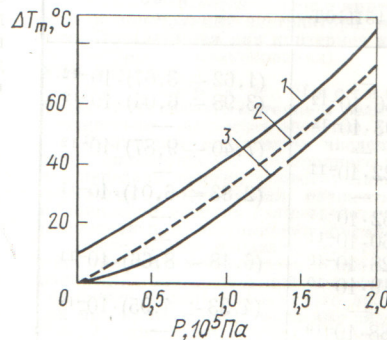


Рис. 3. Подогрев газа в верхней секции при мощности реактора 2500 кВт: 1 — по показаниям термопары; 2 — скорректированная экспериментальная зависимость; 3 — расчетная зависимость

ной погрешностью измерений значений, используемых для теоретической оценки температуры.

Из-за саморазогрева газа и вытеснения его в более холодные области (импульсные линии) регулирующий орган с ³He в качестве поглотителя имеет положительный мощностной коэффициент реактивности. В условиях эксперимента этот коэффициент составляет 8·10⁻⁷ 1%. Его можно значительно уменьшить, если использовать импульсные линии еще меньшего диаметра.

Проведенные исследования показывают, что при давлении поглотителя менее атмосферного доступными средствами можно выполнить достаточно простую и надежную систему регулирования реактором.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потапенко Г. Т. «Атомная техника за рубежом», 1975, № 6, с. 22.
2. Потапенко П. Т. В кн.: Управление ядерными энергетическими установками. Вып. 3. М., Атомиздат, 1963.
3. Филиппук Е. В., Потапенко П. Т., Потапенко Г. Т. В кн.: Автоматизация управления технологическими процессами. Вып. 2. М., Атомиздат, 1977, с. 5.
4. Аринкин Ф. М., Батырбеков Г. А. «Атомная энергия», 1977, т. 42, вып. 5, с. 404.

Поступило в Редакцию 23.11.77
В окончательной редакции 09.01.79

УДК 621.039.524

Об оценке коэффициента запаса до кипения в исследовательских реакторах

ГАРУСОВ Е. А., ПЕТРОВ Ю. В.

Безопасная работа ядерного реактора определяется тем, насколько максимальный тепловой поток через поверхность твэлов меньше критического потока, приводящего к их пережогу. Хотя локальное поверхностное кипение в исследовательских реакторах является, в принципе, допустимым, его дальнейшее неконтролируемое развитие при возникновении больших коэффициентов неравномерности энерговыделения k_V может привести к гидравлической неустойчивости течения теплоносителя и паровой закупорке каналов. Поэтому обычно имеется запас до возникновения пристеночного кипения в наиболее горячей точке активной зоны z_0 . Ниже предлагается простая формула для оценки этого запаса.

Локальный коэффициент запаса до начала кипения теплоносителя в точке z_0 — $k(z_0)$ определяется как отношение теплового потока в данной точке поверхности твэла $q_S(z_0)$, когда ее температура $t_c(z_0)$ равна температуре насыщения теплоносителя $t_c(z_0) = t_S(z_0)$, к фактическому максимальному тепловому потоку $q_{S, \text{макс}}$ [1, 2]:

$$k(z_0) \equiv \frac{q_S(z_0)}{q_{S, \text{макс}}} = \frac{\alpha(z_0, w)}{w} \frac{[t_S(z_0) - t_{\text{вх}}] w v}{q_{S, \text{макс}}}, \quad (1)$$

где w — скорость теплоносителя внутри твэлов; $\alpha(z_0, w)$ — коэффициент теплоотдачи; $t_{\text{вх}}, t_{\text{т}}(z_0)$ — температура теплоносителя на входе в активную зону и в точке z_0 соответственно; $v \equiv [t_S(z_0) - t_{\text{т}}(z_0)] / [t_S(z_0) - t_{\text{вх}}]$ — отношение недогрева теплоносителя в горячей точке к допустимому подгреву.

Определим $q_{S, \text{макс}}$ и w через физические и конструктивные параметры реактора $q_{S, \text{макс}} = N k_V k_{\text{п}} / S$, $w = GH / \omega V$ и введем обозначение $B \equiv \alpha(z_0, w) / w$. Тогда по формуле (1) получим выражение для $k(z_0)$:

$$k(z_0) = B \left(\frac{G}{N} \right) \left(\frac{SH}{V k_{\text{п}} \omega} \right) \frac{v}{k_V} [t_S(z_0) - t_{\text{вх}}], \quad (2)$$

где N — номинальная тепловая мощность реактора; S — полная теплопередающая поверхность; V, H — объем и высота активной зоны; ω — объемная доля теплоносителя в решетке твэлов; $k_{\text{п}}$ — коэффициент неравномерности теплового потока по периметру твэла; G — полный расход теплоносителя через твэлы.

Величина B может быть выражена согласно определению либо через критерий Стантона $B = c \rho \text{St}$, либо через критерий Нуссельта $B = \lambda \text{Nu} / w d_{\text{т}}$ [1—4]. Значения критериев в каждом случае определяли при температуре облучки t_S по известным формулам:

$$\text{Nu} = 0,023 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,4} [\text{Pr}(t_{\text{т}}) / \text{Pr}(t_S)]^{0,06} [1 - 4]; \quad (3)$$

$$\text{St} = (\xi/8) [1,07 + 12,7 \sqrt{\xi/8} (\text{Pr}^{2/3} - 1)], [2,3], \quad (4)$$

Здесь Pr, Re — критерии Прандтля и Рейнольдса; $d_{\text{т}} = 4V/\omega S$ — гидравлический диаметр решетки твэлов; c, λ, ρ — соответственно удельная теплоемкость, удельная теплопроводность и плотность теплоносителя при температуре $t_{\text{т}}(z_0)$; коэффициент трения $\xi = (1,82 \lg \text{Re} - 1,64)^{-2}$.

Формула (2) выражает зависимость локального коэффициента теплотехнического запаса исследовательского реактора от его основных параметров, которые можно разделить на три группы: параметры, определяемые конструкцией (типом) выбранных твэлов и их кассетировкой $H, \omega, S/V k_{\text{п}}$; параметры, определяемые нейтронно-физическими характеристиками активной зоны k_V ; параметры, относящиеся к теплотехническим характеристикам реакторной установки и теплоносителя $c, \rho; G/N$ — удельный расход на единицу мощности, $[t_S(P) - t_{\text{вх}}]$ — максимально допустимый температурный перепад при давлении P в активной зоне.

Из анализа теплотехнических схем различных типов реакторов с легководным теплоносителем (см. таблицу)

Сравнение параметров исследовательских реакторов

Параметр	Тип реактора				
	ИРТ-М [11, 12]	ВВР-М [13, 15]	ВВР-М [15, 16]	СМ-2 [17—20]	HFIR [20, 21]
$N, \text{ мВт}$	8	16	30	100	100
$G/N,$ $\text{ м}^3/(\text{мВт} \cdot \text{ч})$	120	112	67	20	36
Тип твэла	ИРТ-2М	ВВР-М2	ВВР-М3	СМ-2	HFIR
$H, \text{ см}$	58	50	50	35	50,8
$S/V \omega,$ $\text{ см}^2/\text{см}^3$	3,8	6,9	11,3	10,8*	9,1
$P, \text{ атм.}$	1,5	1,35	1,35	50	41
$t_S(P), \text{ }^\circ\text{C}$	108	103	103	260	240
$t_{\text{вх}}, \text{ }^\circ\text{C}$	44	48	50	40	49
v	0,92	0,91	0,82	0,88	0,87
$B, \text{ кВт} \times$ $\times c/(\text{м}^3 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$	$5,8 \pm 0,6$	$5,5 \pm 0,5$	$6,4 \pm 0,4$	$6,5 \pm 0,6$	$5,7 \pm 0,6$
$k \equiv k_V k_{\text{п}} k(z_0)$	2,5	2,9	2,9	2,8	4,3

* По данным работы [20].