

УДК 621.039.524.2.034.44:621.039.519

Экспериментальное определение плотностного коэффициента реактивности теплоносителя для реакторов Билибинской АТЭЦ

БОНДАРЕНКО А. В., ВАЙМУГИН А. А., ДУШИН П. Г., КОСТРОМИН А. Г., ПЛОТНИКОВ Г. В., СОЛДАТОВ Г. Е., ШАРАПОВ В. Н., ЯНОВСКИЙ Э. А.

Билибинская АТЭЦ (БАТЭЦ) состоит из четырех одинаковых блоков с кипящими канальными водографитовыми реакторами, съем тепла в которых осуществляется естественной циркуляцией теплоносителя по шести независимым петлям, замкнутым на один барабан-сепаратор [1, 2]. Первый блок введен в эксплуатацию в январе 1974 г., четвертый — в январе 1977 г.

Все реакторы имеют практически одинаковую конструкцию. Небольшое отличие третьего и четвертого реакторов от двух первых заключается в размещении четырех (из 60) ячеек СУЗ в активной зоне. Поэтому нейтронно-физические характеристики реакторов при одинаковом выгорании топлива совпадают.

Электрическая и тепловая мощность БАТЭЦ регулируется в соответствии с диспетчерским графиком. В течение суток мощность меняется 7—8 раз. Неравномерность суточного графика нагрузки (отношение минимума к максимуму) достигает в зимние дни 0,59, в летние — 0,68. В связи с этим важно знать параметры, определяющие регулируемость реакторов, в частности коэффициенты реактивности.

При быстрых переходных процессах, например при быстром изменении мощности, реактивность реакторов БАТЭЦ меняется в основном вследствие изменения плотности теплоносителя и температуры топлива, так как постоянные времени изменения других параметров, влияющих на реактивность (температура графитовой кладки, концентрация ксенона), существенно больше постоянных времени изменения плотности теплоносителя и температуры топлива. Поэтому с точки зрения регулирования этих реакторов из всех коэффициентов реактивности наибольший интерес представляют плотностной коэффициент теплоносителя и температурный коэффициент топлива. Наибольшая погрешность в расчетах связана с плотностным коэффициентом реактивности. Поэтому эксперимен-

тальное определение его важно для уточнения нейтронно-физических характеристик реакторов.

С марта 1976 г. по январь 1977 г. на БАТЭЦ была проведена серия измерений, чтобы определить плотностной коэффициент реактивности теплоносителя и выяснить, как он изменяется в процессе кампании по мере выгорания топлива. Тогда еще ни один реактор БАТЭЦ не исчерпал полностью запаса реактивности на выгорание, созданного первоначальной загрузкой, которая для всех реакторов была одинаковой. В то же время реакторы разных блоков существенно отличались между собой по выгоранию урана, так как интервал времени между вводом в строй очередных блоков станции составлял примерно один год. Наличие на станции в работе нескольких одинаковых реакторов с разным выгоранием урана способствовало проведению измерений в относительно короткие сроки. Всего было проведено семь измерений на реакторах первого — третьего блоков в диапазоне средних выгораний урана 0,2—5,5 МВт·сут/кг U. Необходимо отметить, что в конце первой кампании (~700 эф. сут) среднее выгорание урана в технологических каналах, загруженных в реактор, равно 6,1 МВт·сут/кг U. Таким образом, измерениями был охвачен практически весь диапазон выгорания урана, соответствующий первой кампании реакторов.

Измерения заключались в том, что в реакторах, работающих на мощности 80% номинальной, на некоторое время изменялись паросодержание и плотность теплоносителя в технологических каналах, и по отработке стержней автоматического регулятора (АР) регистрировалось возникающее при этом изменение реактивности реактора. Плотность теплоносителя в технологических каналах изменялась путем изменения расхода питательной воды. Тепловая схема БАТЭЦ вследствие большого объема воды в

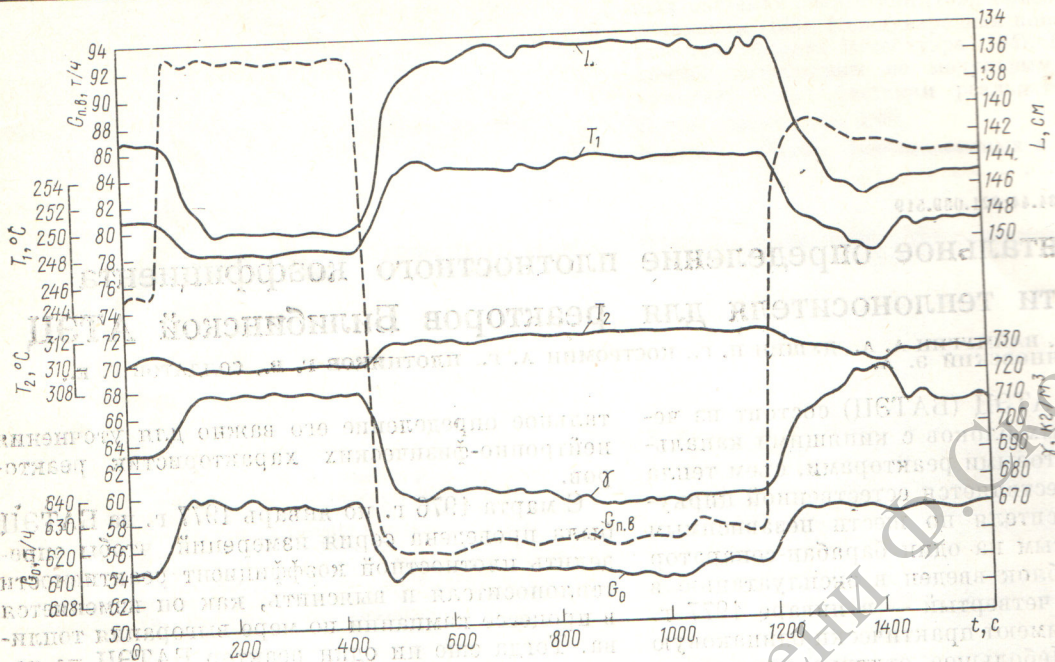


Рис. 1. Изменение параметров второго блока БАТЭЦ через 290 эф. сут:
 T_1 — температура воды на входе в технологические каналы; T_2 — средняя температура топлива;
 $G_{п.8}$ — средняя плотность теплоносителя; L — глубина погружения стержней АР в активную зону

в барабане-сепараторе позволяет путем изменения расхода питательной воды изменять на некоторое время паросодержание в технологических каналах без изменения тепловой мощности реактора. При проведении измерений реактор работал в режиме автоматического поддержания мощности. Изменения реактивности компенсировались перемещением стержней АР. Давление в контуре теплоносителя поддерживалось постоянным и равным 6,5 МПа. Чтобы исключить влияние изменения концентрации ксенона, измерения проводились на реакторах, которые перед этим довольно длительное время (~3 сут) работали на постоянной мощности. Изменение расхода питательной воды в экспериментах проводили в определенном порядке. Вначале расход был увеличен на 15—25% по сравнению с исходным значением, соответствующим стационарному состоянию реактора, и это повышенное значение поддерживали в течение 6 мин. Затем расход питательной воды уменьшали на 30—50%, и при пониженном расходе реактор работал ~7 мин, после чего расход питательной воды повышали до исходного или близкого к нему значения. Расход питательной воды изменялся от 55 до 95 т/ч при общем расходе теплоносителя в циркуляционном контуре ~600 т/ч. Уменьшение и уве-

личение расхода питательной воды проводилось со скоростью 30—120 т/ч за 1 мин.

В экспериментах изменение средней по реактору плотности теплоносителя непосредственно не измерялось, оно определялось расчетным путем по измеренным значениям основных параметров реактора. Поэтому в измерениях наряду с изменениями реактивности реактора регистрировались (с частотой 0,5 или 1 Гц) следующие параметры реактора: расход питательной воды $G_{п.в}$ и общий расход G_0 теплоносителя в циркуляционном контуре, температура топлива (одного из твэлов), мощность реактора, давление в циркуляционном контуре. Регистрацию параметров реактора проводили с помощью специальной установки, разработанной для БАТЭЦ*. Одновременно регистрировались 14 параметров с записью информации в двоичном коде на перфоленте, что давало возможность проводить ее дальнейшую обработку на ЭВМ. Для регистрации использовались сигналы датчиков штатных приборов. Установка к датчикам подключается параллельно штатным регистра-

* Установка разработана и изготовлена Ю. И. Грибановым, А. П. Горматюком, В. Г. Громовым, В. П. Счеславским.

торам, при этом погрешность, вносимая в показания последних, не превышает 1%. Характер изменения основных параметров реактора во время экспериментов показан на рис. 1.

В реакторах БАТЭЦ температура питательной воды примерно на 170 °С ниже температуры воды в барабане-сепараторе. Вследствие этого изменение расхода питательной воды приводит к изменению температуры воды на входе в технологические каналы (°С), которое для установившихся режимов пропорционально изменению расхода питательной воды:

$$\Delta T_1 = -0,21 \Delta G_{п.в} \text{ [т/ч]}. \quad (1)$$

При изменении температуры воды на входе в технологические каналы меняется их гидродинамическое сопротивление и движущий напор естественной циркуляции теплоносителя, что приводит к изменению общего расхода теплоносителя.

Изменение общего расхода теплоносителя и температуры воды на входе в технологические каналы приводит к изменению плотности теплоносителя в них (см. рис. 1) в основном за счет изменения среднего паросодержания и к некоторому изменению температуры топлива вследствие изменения длины экономайзерного участка и температуры теплоносителя на нем. Так как при изменении расхода питательной воды постоянная времени изменения температуры циркуляционной воды существенно больше постоянных времени изменения температуры топлива и плотности теплоносителя, то для определения плотности теплоносителя использованы квазистационарные уравнения. Распределение теплоемкости по высоте канала определялось как функция температуры воды на входе в каналы, расхода теплоносителя и мощности реактора при заданном ее распределении по высоте активной зоны. Объемное паросодержание в кипящей части канала считалось пропорциональным расходу объемному паросодержанию с коэффициентом пропорциональности 0,83. Усреднение плотности теплоносителя проводилось по всему объему теплоносителя в канале, в том числе и по объему центральной опускной трубки канала, где вода не кипит, но плотность ее меняется при изменении температуры воды на входе в канал. При вычислении средней плотности теплоносителя в твэлах учитывалось распределение потока и ценности нейтронов по высоте реактора.

В экспериментах реактивность реактора изменялась только вследствие изменения плотно-

сти теплоносителя и температуры топлива, так как все остальные параметры реактора, влияющие на реактивность (концентрация ксенона, температура графита и т. п.), оставались постоянными. При измерении реактивности реактора $\rho = \Delta k/k$, плотность теплоносителя γ , температура топлива T_2 изменялись в небольших пределах: $\Delta \rho_{\text{макс}} \approx 1,5 \cdot 10^{-3}$, $\Delta \gamma_{\text{макс}} \approx 70 \text{ кг/м}^3$, $\Delta T_{2 \text{ макс}} \approx 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Поэтому функциональную зависимость между этими значениями на всем интервале их изменения можно представить в виде линейной функции

$$\Delta \rho = \rho(t) - \rho(0) = K_\gamma [\gamma(t) - \gamma(0)] + K_T [T_2(t) - T_2(0)], \quad (2)$$

где нулевой момент времени соответствует стационарному состоянию реактора перед началом изменения расхода питательной воды; $K_\gamma = \partial \rho / \partial \gamma$ — плотностной коэффициент реактивности теплоносителя; $K_T = \partial \rho / \partial T_2$ — температурный коэффициент реактивности топлива.

После соответствующей обработки (вычисление γ с учетом значений G_0 и T_1) результаты каждого эксперимента можно представить в виде большого числа (10^3 — 10^4) значений $\rho(t)$ и соответствующих им значений $\gamma(t)$ и $T_2(t)$.

Обработка этих данных позволяла определить плотностной коэффициент реактивности теплоносителя $\partial \rho / \partial \gamma$ как неизвестный параметр, входящий в формулу (2). При вычислении температурный коэффициент реактивности топлива K_T в формуле (2) считался известным и равным $2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (расчетное значение). Следует отметить, что в экспериментах, особенно в тех, которые проводились при относительно небольших выгораниях урана, эффект реактивности за счет изменения температуры топлива был значительно меньше эффекта, связанного с изменением плотности теплоносителя, так как температура топлива в экспериментах изменялась всего на 1—2 °С. Поэтому возможные погрешности, допущенные при определении K_T и T_2 , не внесут существенных погрешностей в конечный результат измерений. Изменения реактивности реактора в экспериментах фиксировались по изменению положения стержней АР и по показаниям реактиметра. Пересчет перемещения стержней АР в абсолютные значения реактивности проводили с учетом расчетных значений их полной эффективности и экспериментально определенных регулировочных характеристик этих стержней.

Эффективность стержней АР в экспериментах изменялась слабо. По оценкам, это изменение вносит вклад в значение K_γ , равный $0,03 \cdot 10^{-5}$,

Измеренный плотностной коэффициент реактивности теплоносителя реакторов первого-третьего блоков БАТЭЦ

Номер реактора, дата его энергоспуска	Дата измерения	Среднее по реактору выгорание урана, МВт·сут/кг U	$K_{\nu} \cdot 10^5$, кг ⁻¹ ·м ³
III, 22.12.75 г.	03.76 г.	0,21	1,50±0,20
	10.76 г.	1,25	1,10±0,15
	01.76 г.	1,76	1,05±0,15
II, 30.12.74 г.	03.76 г.	2,56	0,90±0,15
	10.76 г.	3,74	0,45±0,10
I, 12.01.74 г.	03.76 г.	4,41	0,25±0,10
	10.76 г.	5,49	0,10±0,10

и входит в указанную в таблице погрешность определения коэффициента реактивности.

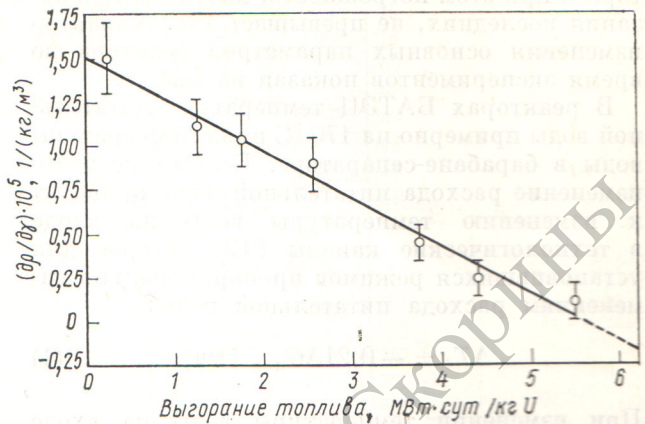
Из приведенных в таблице данных видно, что для состояний реактора со средним выгоранием урана 0,2—5,5 МВт·сут/кг U плотностной коэффициент реактивности теплоносителя K_{ν} положителен. Значение K_{ν} существенно уменьшается с увеличением выгорания урана в технологических каналах. Зависимость K_{ν} от выгорания урана довольно хорошо описывается линейной функцией (рис. 2):

$$K_{\nu} = 1,51 \cdot 10^{-5} - 2,70 \cdot 10^{-6} E, \quad (3)$$

где E — среднее выгорание урана в технологических каналах, расположенных в реакторе, МВт·сут/кг U.

Коэффициенты формулы (3) определены путем обработки данных таблицы методом наименьших квадратов. Согласно этой формуле, K_{ν} должен достичь нулевого значения при выгорании урана 5,6 МВт·сут/кг U, а в самом конце первой кампании при $E = 6,1$ МВт·сут/кг U K_{ν} должен стать отрицательным и равным $0,14 \cdot 10^{-5}$ кг⁻¹·м³.

Хотя в настоящей статье не приводятся расчетные данные по плотностному коэффициенту реактивности, на основании теоретического анализа можно сказать, что положительное значение плотностного коэффициента реактивности теплоносителя в начале кампании объясняется в основном двумя эффектами. С ростом плотности теплоносителя в технологических каналах падает эффективность находящихся в реакторе поглощающих стержней и уменьшается утечка нейтронов из активной зоны. В начале кампании коэффициент размножения нейтронов в решетке каналов реакторов БАТЭЦ (K_{∞}) слабо зависит от плотности воды, и поэтому его изменение несущественно для баланса реактивности.



Р и с. 2. Зависимость плотностного коэффициента реактивности теплоносителя от выгорания топлива:

○ — эксперимент; — расчет по формуле (3)

По мере работы реактора положительный эффект реактивности, связанный с наличием в реакторе поглощающих стержней, уменьшается и появляется отрицательный эффект, обусловленный выгоранием урана и накоплением плутония. К концу первой кампании эффект от стержней СУЗ уменьшается практически до нуля, а эффект от уменьшения утечки нейтронов компенсируется изменением коэффициента размножения нейтронов K_{∞} так, что в целом плотностной коэффициент реактивности теплоносителя становится близким к нулю.

Хотя полученные данные относятся только к первоначальной кампании реактора, их можно использовать и для оценки плотностного коэффициента реактивности теплоносителя при работе реактора в режиме частичных перегрузок технологических каналов. По плану проведения частичных перегрузок реакторов БАТЭЦ в установленном режиме примерно через каждые 300 эф. сут перегружается ~80 технологических каналов. В этом случае среднее выгорание урана в технологических каналах, находящихся в реакторе, сразу же после перегрузки будет равно 3,5 МВт·сут/кг U, а в конце работы, перед следующей перегрузкой, 6,1 МВт·сут/кг U. Можно ожидать, что в установленном режиме частичных перегрузок K_{ν} будет изменяться от $0,56 \cdot 10^{-5}$ до $-0,14 \cdot 10^{-5}$ кг⁻¹·м³. При таких значениях СУЗ реактора обеспечивает его устойчивую и безопасную работу.

Поступила в Редакцию 2.II.78

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамов В. М. и др. «Атомная энергия», 1973, т. 35, вып. 5, с. 299.
- Ваймугин А. А. и др. Там же, 1975, т. 39, вып. 1, с. 3.