

## Исследование мощностных эффектов реактора БР-5

Н. В. Красноярров, Р. В. Никольский, И. А. Ефимов

Рассматриваются результаты экспериментов по изучению мощностных эффектов реактора БР-5 при различных расходах теплоносителя. Описывается метод определения составляющей мощностного эффекта, связанной с разогревом сердечников твэлов.

Изучение мощностных эффектов реактивности необходимо для знания поведения реактора как в условиях саморегулирования, так и в обычных условиях эксплуатации. Влияние изменения мощности на реактивность представляет собой обратную связь, приводящую к устойчивому либо неустойчивому поведению реактора или содействующую этому.

В работах [1—4] показано, что особое значение для устойчивости имеет наиболее быстрая компонента в изменении реактивности, сопровождающем изменение мощности. Поэтому при изучении мощностных эффектов важно определить эту быструю компоненту. Эксперимент должен быть организован так, чтобы обеспечить безопасность даже в том случае, когда проводятся исследования реактора в неустойчивых режимах.

Нестационарные процессы в объекте, имеющем входной и выходной параметры, могут изучаться как импульсным, так и гармоническим способами, т. е. наблюдать закон изменения выходного параметра можно при ступенчатом или гармоническом изменении входного параметра. Примеры использования таких методов для быстрых реакторов приведены, например, в работах [1, 2]. В этих экспериментах измерения проводились с выключенной системой автоматического регулирования (АР). С точки зрения безопасности целесообразно, чтобы система АР была включенной. Один из способов, удовлетворяющий этому требованию, — введение в систему АР гармонического электрического сигнала и наблюдение амплитуды основной гармоники в колебаниях стержня АР и мощности. Соотношение амплитуд и разность фаз позволяют определить передаточную функцию реактора  $k(j\omega)$ . Другой способ — введение в систему АР ступенчатого электрического сигнала и наблюдение за временным поведением стержня АР и мощности. Технически это сводится к достаточно быстрому изменению положения задатчика мощности.

Стержень АР совершает движение, стремясь изменить мощность от одного постоянного значения до другого. При хорошем качестве системы АР это изменение мощности можно рассматривать как скачкообразное и поведение стержня АР отождествлять с переходной характеристикой  $r(\tau)$  реактора, у которого мощность принимается в качестве входного параметра, а реактивность — выходного. Этот путь исследования применялся на реакторе БР-5.

Третий способ совершенно не связан с каким-либо внешним воздействием на реактор и сводится к наблюдению корреляции колебаний реактивности и мощности, возникающих под влиянием различных флуктуаций в реакторе [5].

На рис. 1 (кривая 1) приведено изменение мощности, которое удалось достигнуть на реакторе БР-5 при введении ступенчатого сигнала в систему АР. Кривые 2 и 3 представляют собой поведение стержня АР соответственно при

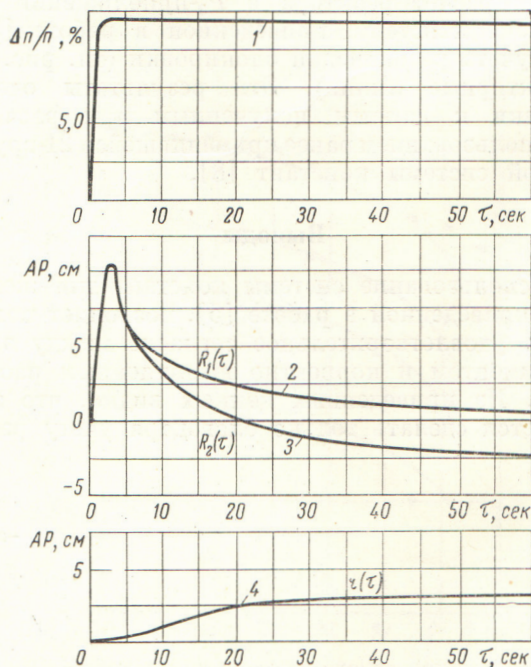


Рис. 1. Переходные процессы при введении ступенчатого сигнала в систему АР.

малой и большой мощностях реактора. Так как одинаковому характеру изменения мощности соответствует одинаковое изменение реактивности, то разница в поведении стержня АР  $r(\tau)$  (кривая 4) является результатом влияния изменения мощности на реактивность. Для исключения возможных ошибок относительные изменения мощности в случаях 2 и 3 задавались одинаковыми и выполнялись при одних и тех же температурных условиях и положениях других стержней регулирования. Опыты с целью оценки и усреднения влияния различных случайных процессов на результаты измерения многократно повторялись. В частности, сопоставимость результатов измерений при скачках мощности указывает на то, что кинематика устройств между стержнем и датчиком его положения заметно не искажает записи временного поведения реактивности спустя 2—3 сек. Не вносит искажений в этом временном интервале и система записи положения стержня.

Для удобства пересчета изменения положения стержня в изменение реактивности все измерения в основном проводились в линейной части стержня АР. Градуировочная кривая эффективности стержня при рабочей температуре измерений приведена на рис. 2. В отдельных случаях вводились поправки на отклонение от линейности.

Оценивая возможности этого метода, можно сказать, что он позволяет получить переходную характеристику цепи обратной связи (влияние мощности на реактивность) реактора



Рис. 2. Градуировочный график стержня АР.

для сравнительно медленных процессов. Быстрые процессы ( $\sim 1$  сек) дадут лишь свое асимптотическое значение. В течение первых 2—3 сек точность измерений ухудшается также за счет того, что стержень АР при этом сильно отклоняется с большой скоростью, а конечный результат является разностью этих отклонений. Кроме того, может сказываться разница в характере изменения мощности.

На реакторе БР-5 [6—8] изменение реактивности после скачка мощности вызывается тремя группами процессов:

1) неоднородным разогревом компонентов активной зоны (через 1—5 сек), что приводит к ее расширению, некоторому прогибу твэлов и пакетов;

2) разогревом натрием центральной трубы с активной зоной (через 2—20 сек), вызывающим относительное смещение активной зоны и элементов отражателя;

3) однородным разогревом всех компонентов активной зоны натрием, поступающим с повышенной температурой на вход реактора (через  $\sim 20$  сек).

На первом этапе работы реактора БР-5 было обнаружено, что суммарный эффект разогрева компонентов активной зоны и центральной трубы вызывает нулевое изменение реактивности [9].

При достижении 2%-ной глубины выгорания и больших выгораниях этот эффект стал положительным и достиг значения  $(2 \div 4) \cdot 10^{-4}$   $\text{Мвт}^{-1}$ . Такое явление, по-видимому, связано с постепенным увеличением размеров брикетов двуокиси плутония в твэлах реактора БР-5 и сцеплением их с оболочкой. В результате этого расширение активной зоны в осевом направлении заметно уменьшилось, так как удлинение столбика двуокиси плутония в несколько раз превышает удлинение оболочки.

В 1963 г. после замены части твэлов измерения были повторены и проведены при различных расходах теплоносителя. Одна из задач этого эксперимента — выделение той составляющей мощностного эффекта, которая связана с разогревом горючего.

Предварительные расчеты характера изменения температуры горючего, оболочки, натрия, стенок пакета показали, что первая группа процессов происходит достаточно быстро при всех значениях расхода натрия, и в интервале 6—20 сек можно наблюдать асимптотическое значение реактивности, вносимой этой группой процессов. Центральная труба разогревается медленнее, и процесс появления реактивности от этого эффекта можно наблюдать в эксперименте. Асимптотическое значение процесса достигается спустя 20 сек.

В таблице приведены характерные данные условий эксперимента.

Результаты измерений  $r(\tau)$ , нормированные к такому скачку мощности, который соответствует постоянному изменению подогрева теплоносителя ( $70^\circ \text{C}$ ), приведены на рис. 3 (но-

Условия эксперимента по определению составляющей мощностного эффекта, вызванной разогревом горючего

Номер эксперимента	Расход натрия, м <sup>3</sup> /ч	Мощность, кВт	Подогрев натрия, °С	Изменение мощности, кВт	
1	245	2000	30	+200	-150
2	145	1600	40	+225	-100
3	83	1350	60	+225	-225
4	44	875	76	+100	-100
5	25	430	70	+50	-50
6	10	140	50	+20	-20

Это объясняется возвратом на вход реактора подогретого натрия.

Однородный разогрев компонентов активной зоны приводит к отрицательному эффекту реактивности, что подтверждается ранее проведенными опытами по измерению температурного эффекта, равного

$$k_T = 3,3 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Таким образом, рассматривая переходные характеристики  $r(\tau)$  при различных расходах теплоносителя, можно разделить быстрые и медленные процессы изменения реактивности.

мер кривой соответствует номеру эксперимента в таблице). На каждой кривой можно выделить три участка:

1. В интервале 0—3 сек данный метод не дает достаточно достоверных данных о переходной характеристике. Через 5—6 сек наблюдается почти нулевое значение реактивности. Это указывает на то, что быстрые процессы, происходящие в активной зоне, суммируясь после скачка мощности, вносят нулевой вклад.

2. По истечении ~6 сек наблюдается плавный подъем реактивности до некоторой максимальной величины. Время нарастания реактивности при этом зависит от расхода теплоносителя. Например, для кривых 5, 6, соответствующих самым малым расходам, оно составляет более 60 сек. Поскольку все процессы в активной зоне в этом интервале времени уже установились, такой рост объясняется более медленным эффектом удлинения центральной трубы реактора.

3. По достижении некоторого максимального значения реактивность начинает спадать тем быстрее, чем больше расход теплоносителя.

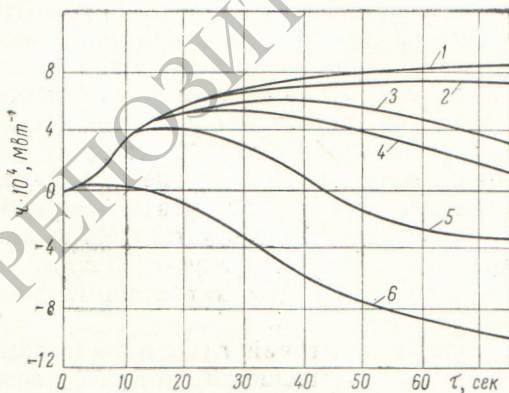
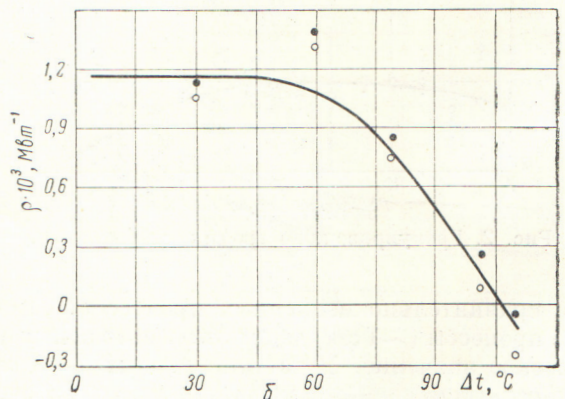
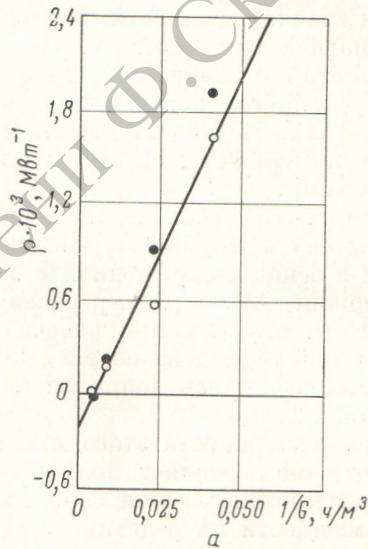


Рис. 3. Изменение реактивности, вызванное изменением мощности, при различных расходах теплоносителя.

Рис. 4. Асимптотическое значение изменения реактивности, вызванного разогревом компонентов активной зоны и центральной трубы, при различных расходах (а) и различных подогревах (б) теплоносителя:

○ — положительные скачки мощности; ● — отрицательные скачки мощности.

Асимптотическое или предельное значение реактивности, наблюдающееся на втором участке каждой кривой, не является постоянным. Это объясняется различным вкладом в реактивность от разогрева сердечников твэлов.

Зависимость значений реактивности от величины, обратной расходу теплоносителя ( $G$ ), является линейной. Продолжение ее для бесконечно больших расходов теплоносителя ( $1/G \rightarrow 0$ ) дает значение эффекта, связанного лишь с разогревом горючего. Этот факт иллюстрируется рис. 4, а. Данные о реактивности здесь пересчитаны на постоянный скачок мощности 1 Мвт. Значение эффекта, связанного с разогревом горючего для реактора БР-5, полученное с помощью метода наименьших квадратов, оказывается равным

$$\rho = -(1,5 \pm 0,3) \cdot 10^{-4} \text{ Мвт}^{-1}.$$

Таким образом, в этом эксперименте без непосредственного наблюдения развития процессов в первые 4—5 сек определено значение наиболее быстрой составляющей мощностного эффекта.

Отрицательный эффект от горючего и положительный эффект от компонентов, температура которых связана с расходом натрия, должны привести к тому, что при расходе 245 м<sup>3</sup>/ч в первые секунды должно наблюдаться отрицательное значение  $\rho$  ( $\tau$ ), переходящее затем (за счет удлинения центральной трубы) почти к нулевому значению и далее снова к отрицательному после возврата натрия на вход реактора. Однако измерения при  $G = 245 \text{ м}^3/\text{ч}$  непосредственно не дают этой картины, по-видимому, из-за неточности измерений в течение первых секунд.

Пересчеты экспериментальных данных на постоянные значения подогрева теплоносителя или изменения мощности могут быть справедливы лишь при линейном изменении реактивности в зависимости от изменения мощности. Это предположение требует экспериментальной

проверки, так как эффекты, связанные с изменением геометрии реактора, зависят от зазоров, которые при некоторых условиях исчезают. Специальный эксперимент при расходе натрия 28 м<sup>3</sup>/ч и постоянной входной температуре натрия был проведен при мощностях, соответствующих подогреву теплоносителя на 30, 60, 80, 100°С. Этот эксперимент показал (см. рис. 4, б), что в интересующем нас диапазоне (0—70°С) практически существует линейность. Одновременно было обнаружено явное отклонение от линейности при подогревах натрия, превышающих 70°С.

Полное исследование поведения  $\rho$  ( $\tau$ ) осцилляторным методом в первые секунды, исследование связи границы потери линейности с величиной расхода теплоносителя, а также исследование происхождения нелинейных эффектов — этапы дальнейшей работы на реакторе БР-5.

Поступила в Редакцию 10/IV 1964 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Андреев, О. Д. Казачковский, Н. В. Краснояров. «Атомная энергия», 7, 363 (1959).
2. Ф. Тэлготт и др. В кн. «Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии». Избр. докл. иностр. ученых. Т. 3. М., Атомиздат, 1959, стр. 600.
3. R. Astoud, G. Kinchin. Доклад № 1462, представленный Великобританией на Вторую международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958).
4. K. Henry, D. Smith. Nucl. Energy Soc., 1, No. 3 (1962).
5. А. И. Могильнер. Physics of Fast and Intermediate Reactors. Pt. 3. Vienna, IAEA, 1962, p. 33.
6. А. И. Лейпунский и др. Там же, стр. 328.
7. А. И. Лейпунский, О. Д. Казачковский, М. С. Пинхасик. «Атомная энергия», 7, 370 (1961).
8. А. И. Лейпунский и др. См. [5, 6], стр. 318.
9. Н. В. Краснояров. Reactor Safety and Hazards Evaluation Techniques. SM 24/81. Vienna, IAEA, 1962.

