

Экспериментальные данные, полученные при пуске реакторов БАТЭЦ, могут быть использованы для проверки и других методов расчета уран-графитовых систем.

Авторы благодарят сотрудников ФЭИ и БАТЭЦ, участвовавших в физических пусках реакторов этой станции.

Поступила в Редакцию 07.08.78

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимов И. С. и др. В кн.: Груды ФЭИ «Вопросы физики ядерных реакторов». Вып. 1. Обнинск, 1968, с. 385.

2. Орлов В. В. и др. «Атомная энергия», 1974, т. 36, вып. 6, с. 491.
3. Ваймугин А. А. и др. Там же, 1975, т. 39, вып. 1, с. 3.
4. Абрамов В. М. и др. Там же, 1973, т. 35, вып. 5, с. 299.
5. Ваймугин А. А. и др. Там же, 1975, т. 39, вып. 2, с. 110.
6. Дубовский Б. Г. и др. Там же, 1974, т. 36, вып. 2, с. 104.
7. Акимов И. С. и др. Там же вып. 6, с. 427.

УДК 621.039.524.2.034.3

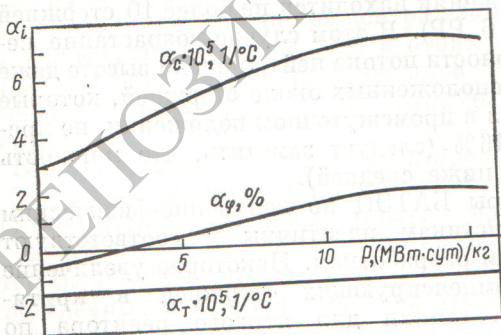
О способах воздействия на коэффициенты реактивности в реакторах РБМК

ПУШКАРЕВ В. И., ЖИРНОВ А. Д., СИРОТКИН А. П.

Во время вывода реактора РБМК в установившийся режим непрерывной перегрузки топлива его активная зона претерпевает существенные изменения. Практически с самых первых дней эксплуатации реактора начинается извлечение дополнительных поглотителей (ДП), компенсирующих начальную реактивность, а в освободившиеся каналы загружаются топливные кассеты (ТК). В первый период работы свежие ТК практически не отличаются по выгоранию от кассет первоначальной загрузки, но постепенно разница в выгораниях отдельных ТК все сильнее сказывается на их индивидуальных физических характеристиках, в том числе и на вкладе, который они вносят в инте-

гральные коэффициенты реактивности активной зоны. Совокупное изменение структуры активной зоны, ДП и среднего выгорания топлива создает довольно сложную картину изменения коэффициентов реактивности по мере работы реактора. Изменение отдельных коэффициентов реактивности с выгоранием показано на рис. 1. Отметим, что реальная картина изменения коэффициентов реактивности выглядит значительно сложнее, так как в процессе эксплуатации, особенно в начальный период освоения проектной мощности АЭС, теплогидравлические и другие параметры реактора могут заметно отличаться от номинальных, что отражается на фактических коэффициентах реактивности.

Расчетное или экспериментальное определение коэффициентов реактивности не является самоцелью. Их достоверность во многом определяет точность прогнозирования динамического поведения реактора и стабильности энергораспределения в стационарных и переходных режимах работы реактора. В значительной степени обеспечение стабильности энергораспределения в реакторе ложится на систему регулирования реактора. Их характеристики непрерывно улучшаются, и в перспективе предполагается переход на полностью автоматизированное управление реактором с помощью ЭВМ. Однако достижение наилучших динамических параметров регулируемой системы во многом упростит решение этой задачи в будущем, а в настоящее время облегчит действия оператора по управлению реактором. С этим и связана потребность



Р и с. 1. Изменение коэффициентов реактивности по мере выгорания топлива:

α_c , α_T — температурный коэффициент замедлителя и топлива соответственно; α_f — паровой коэффициент; P — среднее выгорание топлива

воздействия на коэффициенты реактивности работающих реакторов.

Как отмечается в работе [1], «... принятое в проекте (РБМК) уран-графитовое соотношение не вполне оптимально с позиций управления реактором в переходных режимах. В последующих реакторах уран-графитовое соотношение будет приближено к оптимальному, а управление распределением мощности будет осуществляться автоматически». Этот вывод, полученный на основании эксплуатации головного блока ЛАЭС, можно сделать и на основании расчетных исследований динамических характеристик реактора. Действительно, по мере изменения коэффициентов реактивности постоянная времени развития деформации энергораспределения по радиусу (ее первой азимутальной, наименее стабильной гармонике) τ_{01} по мере работы уменьшается от нескольких часов в начальный период до нескольких минут в установившемся режиме перегрузок топлива (рис. 1). Однако оценить допустимый уровень снижения τ_{01} , обеспечивающий надежное и безопасное управление реактором оператором, использующим имеющиеся в его распоряжении средства контроля и управления энергораспределением, можно только опытным путем. В частности, было показано, что при эксплуатации реактора без локальных автоматических регуляторов минимально допустимое время τ_{01} составляет 15—20 мин. В соответствии с этим можно определить и оптимальную для эксплуатации реактора совокупность коэффициентов реактивности: паровой коэффициент α_{ϕ} * должен быть в диапазоне $\pm 1\%$, температурный коэффициент замедлителя α_c не более $5 \cdot 10^{-5}$ 1/°C, температурный коэффициент топлива α_T — в диапазоне от $-1 \cdot 10^{-5}$ до $-2 \cdot 10^{-5}$ 1/°C. Как видно, между желательными и существующими коэффициентами реактивности имеется определенное расхождение, для ликвидации которого должны быть приняты соответствующие меры.

Ниже изложены результаты расчетных исследований по выявлению зависимости коэффициентов реактивности от основных теплогидравлических и эксплуатационных параметров активной зоны, а также по выбору наиболее эффективных способов повышения стабильности энергораспределения как в действующих, так

и в проектируемых реакторах. Основное внимание обращено на паровой (α_{ϕ}) и температурный (α_c) коэффициенты реактивности, так как именно они, во-первых, оказывают наиболее сильное влияние на стабильность энергораспределения, и, во-вторых, сильно зависят от параметров активной зоны.

В отношении действующих реакторов все мероприятия по изменению коэффициентов реактивности можно условно разделить на две группы:

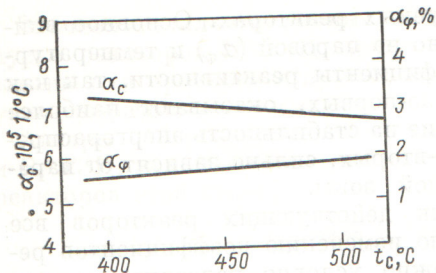
— использование эксплуатационных режимов, обеспечивающих сочетание теплогидравлических характеристик реактора, при которых коэффициенты реактивности поддерживаются в заданном диапазоне;

— реализация таких технологических мероприятий, которые снижают коэффициенты реактивности и улучшают стабильность энергораспределения.

Сюда относятся увеличение обогащения топлива и его плотности, в том числе и переход на металлическое топливо, увеличение ДП в зоне, оперативного запаса реактивности и т. п. Для проектируемых реакторов, помимо перечисленных, могут быть реализованы такие способы воздействия на коэффициенты реактивности, которые несут необратимый, неизменяемый в процессе эксплуатации характер. К ним можно отнести изменение шага решетки ТК и (или) эффективной плотности замедлителя.

Рассмотрим влияние указанных факторов на коэффициенты реактивности. Расчетные зависимости α_{ϕ} и α_c от температуры замедлителя, средней плотности воды и числа стержней, компенсирующих оперативный запас реактивности, достаточно сильные и их необходимо учитывать при сопоставлении расчетов и экспериментов. В особенности это касается парового коэффициента реактивности. При малых отклонениях от номинальных параметров эти зависимости практически линейны и могут быть представлены следующими соотношениями: повышение температуры графита на 100° увеличивает α_{ϕ} на 0,2% и уменьшает α_c на $0,45 \cdot 10^{-5}$ 1/°C; повышение средней плотности воды на 0,1 г/см³ увеличивает α_{ϕ} на 0,37% и уменьшает α_c на $0,05 \cdot 10^{-5}$ 1/°C; рост оперативного запаса реактивности на 10 стержней снижает α_{ϕ} на 0,3%. Совокупное отклонение теплотехнических характеристик активной зоны при изменении мощности (при постоянном расходе теплоносителя) вносит поправку к коэффициенту реактивности, показанную на рис. 2, причем основным фактором, определяющим зависимость α_{ϕ} от мощ-

* Паровой коэффициент реактивности α_{ϕ} определяется как $\alpha_{\phi} = \Delta\rho/\Delta\phi$, где $\Delta\rho$ — изменение реактивности при изменении среднего объемного паросодержания на $\Delta\phi$.



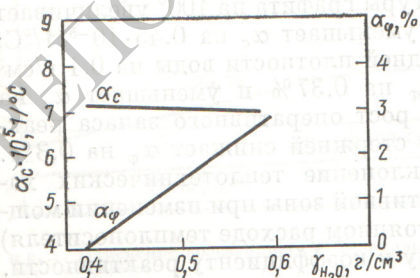
Р и с. 2. Зависимость коэффициентов реактивности от температуры графита

ности, является изменение средней плотности теплоносителя.

Увеличение средней плотности топливных таблеток оказывается важным не только с точки зрения повышения работоспособности твэлов, но и положительно воздействует на паровой коэффициент реактивности: увеличение средней плотности таблеток на $0,1 \text{ г/см}^3$ уменьшает α_ϕ на $0,27\%$. Наиболее оперативным способом предотвращения роста парового коэффициента реактивности выше допустимого уровня является сохранение в зоне ДП. При этом, очевидно, существенный ущерб наносится нейтронному балансу, проявляющийся в уменьшении глубины выгорания выгружаемого топлива: увеличение числа ДП в активной зоне на 10 стержней уменьшает α_ϕ на $0,12\%$, однако глубина выгорания выгружаемого топлива снижается на $0,54 \text{ (МВт}\cdot\text{сут)/кг}$.

Более эффективной мерой, улучшающей динамические характеристики реактора, является рост обогащения свежего топлива. В частности, увеличение начального обогащения с $1,8$ до $2,0\%$ уменьшает α_ϕ на $0,6\%$. Получаемое при этом увеличение глубины выгорания выгружаемого топлива на $3,8 \text{ (МВт}\cdot\text{сут)/кг}$ даже несколько улучшает технико-экономические показатели реактора.

Для проектируемых реакторов, конструкция которых может быть изменена в соответствии



Р и с. 3. Зависимость коэффициентов реактивности от средней по активной зоне плотности воды

с оптимизационными исследованиями, наиболее эффективной мерой снижения коэффициентов реактивности является уменьшение соотношения ядер графита и ^{235}U в активной зоне. При этом глубина выгорания изменяется незначительно, а за счет более эффективного использования ^{238}U и большего накопления плутония снижается мощность свежезагруженных ТК. Наиболее очевидным способом снижения графит-уранового соотношения является уменьшение шага решетки каналов в реакторе. Однако поскольку уменьшение шага решетки каналов обычно сопровождается трудностями с разводкой коммуникаций, подводящих и отводящих теплоноситель, то представляют интерес и предложения по уменьшению эффективной плотности графита. Как показывают расчеты, оба эти фактора влияют на коэффициенты реактивности одинаково и количественно их можно представить в виде соотношения ядер графита и ^{235}U N_C/N_5 (рис. 3).

Отметим, что приведенные рассуждения относятся к обогащению загружаемого топлива $1,8-2,0\%$. При увеличении глубины выгорания, а следовательно, и повышении обогащения загружаемого топлива, например выше 3% , шаг решетки или эффективную плотность графита возможно потребуется не уменьшать, а увеличивать.

Значительно уменьшается паровой коэффициент реактивности при переходе с двуокисного топлива на топливо повышенной плотности, например металлический уран. Такой переход обладает многими другими достоинствами [2], поэтому ожидаемые большие технологические и эксплуатационные трудности возможно будут оправданными.

Представляют интерес результаты, которые получены при рассмотрении влияния формы распределения потока нейтронов по высоте на паровой коэффициент реактивности реактора. С учетом зависимости α_ϕ от плотности воды можно ожидать, что средний для всей активной зоны паровой коэффициент реактивности должен быть различным при разных высотных энергораспределениях. Согласно расчетам оказалось, что увеличение α_ϕ при переходе от энергораспределения с максимумом в верхней части активной зоны к энергораспределению с максимумом в нижней части активной зоны составляет $\sim 1,0\%$, что безусловно сказывается на стабильности радиального энергораспределения. Подобного рода эффекты необходимо учитывать и при выборе распределения поглощающих свойств ДП по длине канала в случае,

если для уменьшения коэффициентов реактивности в активной зоне задерживается на достаточно длительное время некоторая часть первоначально загруженных ДП. Расчетная оптимизация их свойств достаточно сложна, поскольку при этом накладываются друг на друга неопределенности как физического, так и теплогидравлического характера. При изменении мощности канала плотность воды перераспределяется по всей длине парообразующего участка, однако наибольшее изменение паросодержания и плотности воды происходит в ограниченной области примерно в средней части канала. Это дает возможность выбора распределения поглощающих свойств ДП по высоте с точки зрения наиболее эффективного воздействия на паровой коэффициент. Однако при этом следует иметь в виду, что даже незначительное изменение свойств ДП по высоте отражается на высотном энергораспределении, которое в свою очередь скажется на парораспределении по длине ТК. Влияние ДП различных свойств на паровой коэффициент реактивности и форму энергораспределения по высоте иллюстрируется рис. 4, на котором показаны изменения формы высотного энергораспределения, коэффициента его неравномерности K_z , парового коэффициента $\Delta\alpha_\varphi$ и эффективности ДП $\Delta\rho$. Последние два параметра приведены по отношению к составу ДП, показанному на рис. 4, а.

Выводы. В реакторах типа РБМК существует много возможностей для воздействия на коэффициенты реактивности, в первую очередь на паровой коэффициент α_φ . Некоторые из этих способов могут быть реализованы лишь при сооружении новых реакторов и носят необратимый характер (например, изменение шага решетки ТК). Другие, представляющие больший интерес, позволяют оперативно влиять на коэффициенты реактивности уже действующих реакторов. Сюда относятся такие сильные, но не экономичные приемы, как задержка некоторого количества ДП в активной зоне или увеличение оперативного запаса реактивности,

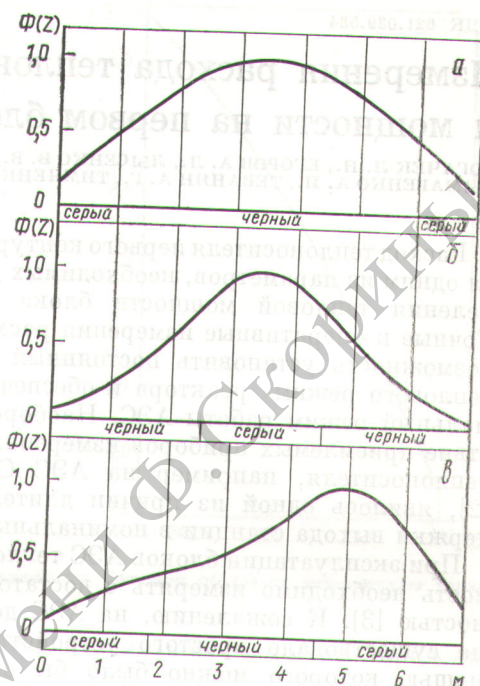


Рис. 4. Влияние свойств ДП по высоте на параметры активной зоны:

- а — $K_z = 1,50$; $\Delta\alpha_\varphi = 0$; $\Delta\rho = 0$;
 б — $K_z = 2,0$; $\Delta\alpha_\varphi = +0,35\%$; $\Delta\rho = +0,014$;
 в — $K_z = 1,80$; $\Delta\alpha_\varphi = +0,25\%$; $\Delta\rho = +0,011$

а также экономически эффективные способы, связанные с увеличением плотности топлива и начального обогащения. Весьма существенное влияние на паровой коэффициент реактивности оказывают такие эксплуатационные режимы, как поддержание на требуемом уровне средней плотности воды в реакторе и высотного энергораспределения.

Поступила в Редакцию 17.06.78

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров А. П., Доллежал Н. А. «Атомная энергия», 1977, т. 43, вып. 5, с. 337.
2. Жирнов А. Д. и др. «Атомная энергия», 1973, т. 34, вып. 6, с. 479.