

Рис. 4. Изменение мощности опытной ТВС и реактивности в зависимости от давления  $^3\text{He}$ : — эксперимент ( $\square$  — по камере деления;  $\times$  — по активационным детекторам;  $\triangle$  — по положению регулирующего стержня); — — — расчет; 1, 2 — для каналов 1—4 и 4—0 соответственно

риментах определяли по показаниям камеры деления и проверяли методом активационных детекторов. В качестве детекторов использовали диспрозиевые пленки. Максимальное отклонение от первоначального уровня мощности после заполнения секций экрана  $^3\text{He}$  под давлением 0,8 МПа составляет  $\sim 50\%$ . Показано также изменение реактивности критической сборки, которое не

превышает 0,11  $\beta_{эф}$  и 0,22  $\beta_{эф}$  для каналов 4—0 и 1—4 соответственно.

Расчет зависимости ослабления потока нейтронов в топливе от давления газа и распределение его внутри ячейки в радиальной геометрии проводили по программе WIMS-D [7]. Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментом. Из опытных данных (таблица) следует, что регулирующий орган практически не влияет на энергораспределение в соседних каналах.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований, полученные на критической сборке, свидетельствуют об удовлетворительной эффективности разработанной конструкции регулирующего органа и системы регулирования энерговыделения петлевых каналов на основе  $^3\text{He}$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бибилашвили Ю. К., Медведев А. В. — Атомная техника за рубежом, 1979, № 7, с. 3.
2. Segel A. AEC-6218, 1978.
3. Proc. Intern. Conf. on Nuclear Power and its Fuel Cycle. Salzburg, 1977.
4. Аринкин Ф. М., Батырбеков Г. А. — Атомная энергия, 1977, т. 42, вып. 5, с. 404.
5. Емельянов И. Я. и др. — Там же, 1979, т. 47, вып. 5, с. 334.
6. Чабак А. Ф. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомно-водородная энергетика, 1977, вып. 2(3), с. 127.
7. As Kew I., Fayers F., Kewshell P. A general description of the lattice code WIMS. IBNES, Oct. 1966, p. 564.

Поступила в Редакцию 26.02.81

УДК 621.039.516.22

## Применение выгорающих поглотителей в РБМК

ВИКУЛОВ В. К., ДОРШАКОВ С. А., ИЛЮХИН В. И., МИТЯЕВ Ю. И.

Интенсивное развитие ядерной энергетики делает существенным даже небольшие улучшения характеристик энергетических реакторов. Одним из таких усовершенствований топливного цикла РБМК [1] является повышение обогащения урана. Оно позволяет значительно увеличить его выгорание, что в свою очередь заметно снизит потребность в природном уране и уменьшит топливную составляющую себестоимости вырабатываемой электроэнергии. Однако повышение обогащения урана не всегда возможно. В режиме непрерывных перегрузок топлива и при выводе реактора в этот режим топливные каналы (ТК) активной зоны имеют различную энерговыработку (выгорание), от нулевой (свежие) до энерговыработки выгораемых. Поэтому содержание делящихся изотопов в них неодинаково, что обуславливает дополнительный коэффициент неравномерности

мощности из-за их перегрузки [2]. С повышением обогащения коэффициент перегрузки увеличивается, а это может привести к недопустимой по условиям теплоотвода неравномерности энергораспределения. Такое ограничение особенно существенно для реакторов с высокой удельной мощностью топлива, какими являются РБМК-1500 и РБМКП. Для преодоления такого ограничения предлагается в качестве одного из возможных способов использовать самоэкранированный выгорающий поглотитель, помещаемый в виде поглощающего стерженька в свежие ТВС при загрузке в реактор. Реализация способа облегчается тем, что в конструкции отдельных ТВС РБМК предусмотрено центральное отверстие диаметром 6,5 мм [3].

Обычно выгорающие поглотители [4—7] применяются для уменьшения реактивности, компенсируемой подвижными органами регулирования, когда



ее запас на выгорание велик. В данном случае реактор работает в режиме непрерывных перегрузок, и компенсирующая способность органов регулирования заведомо недостаточная. Ограниченной оказывается способность к локальному выравниванию энергораспределения, поскольку каждый из них воздействует на довольно обширную область поля нейтронов, в которую попадают как свежезагруженные, так и выгоревшие ТК, и влияние органов регулирования на мощность ТК оказывается недостаточно дифференцированным. Поэтому здесь использование выгорающих поглотителей направлено только на локальное выравнивание энергораспределения.

Перед авторами исследования были поставлены две задачи:

определить плотность поглощающего материала и диаметр поглощающих стерженьков, помещаемых в центр ТВС, которые в наибольшей степени снизят мощность загружаемых ТК при наименьшем суммарном за время работы поглощении нейтронов в поглотителе;

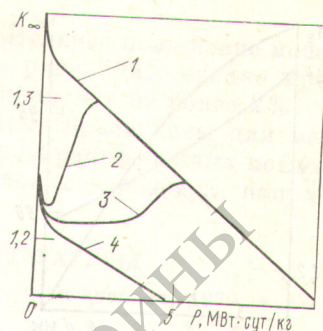
найти при имеющихся теплотехнических ограничениях максимальной мощности ТК те условия их применения, при которых возможно повышение обогащения и выгорания урана, приводящее к улучшению экономических показателей топливного цикла.

Принципиальный подход к решению первой задачи, т. е. к выбору оптимального выгорающего поглотителя с наилучшей согласованностью между его выгоранием и выгоранием топлива, остается таким же, как и приведенный в работах [6, 7], однако метод решения иной. Он основан на применении вычислительной программы ВОР [2], позволяющей рассчитывать пространственное распределение тепловых нейтронов в ячейке ТК в  $P_3$ -приближении с частой расчетной сеткой в области поглощающих стерженьков (такой, что расстояние между расчетными узлами намного меньше длины пробега нейтронов). Благодаря этому при использовании малого временного шага оказался возможным непосредственный расчет «обгорания» [7] стерженьков с одновременным выгоранием урана и соответствующий учет изменения нейтронно-физических характеристик ячеек ТК с кампанией\*.

При решении второй задачи, требующей гетерогенного расчета реактора, применяли двумерную диффузионную сеточную программу NODINER [8], двугрупповые макросечения ячеек для которой рассчитывали в первой части.

Эксперименты показали, что при установке в центральное отверстие ТВС поглощающих стерженьков диаметром 5,6 мм мощность свежих

Рис. 1. Зависимость коэффициента размножения нейтронов в бесконечной решетке ТК РБМК  $K_{\infty}$  от выгорания урана  $P$  при плотности  $Gd_2O_3$ , равной 0 (1), 0,2 (2), 0,45 (3) и 1 г/см<sup>3</sup> (4)



ТК снижается на 10–15%. В экспериментах, как и в расчетах, поглотителем являлась окись гадолиния  $Gd_2O_3$ , имеющая два сильных поглощающих изотопа  $^{155}Gd$  и  $^{157}Gd$ . Если предположить одинаковый темп выгорания урана и поглотителя, то реактивность и мощность свежих ТК и поглощающих стерженьков будут, пока не выгорит поглотитель, неизменными. Вследствие этого коэффициент неравномерности энергораспределения в реакторе уменьшится на те же 10–15%. На практике поддержать одинаковый темп выгорания урана и поглотителя на протяжении всего времени выгорания поглощающих стерженьков невозможно. Однако, как следует из результатов работы [7] и настоящего исследования, несоответствие темпов выгорания может быть сведено к минимуму при определенной концентрации гадолиния. Это подтверждается графиками рис. 1, иллюстрирующими различное воздействие на реактивность ТК РБМК самозакранируемых выгорающих поглотителей в процессе одновременного выгорания урана и гадолиния. Обогащение урана в ТК составляет 2,6%. При небольшой концентрации поглотителя выгорание стерженьков опережает выгорание урана, и наблюдается быстрый рост реактивности, а значит и мощности (кривая 2). Напротив, при высокой концентрации гадолиния стерженьки выгорают слишком медленно (кривая 4) и, хотя максимальная мощность ТК  $N_{max}$  при этом снижается (она определяется начальной точкой), потери реактивности слишком велики, что неоправданно уменьшает выгорание урана. Очевидно, есть такая концентрация поглотителя, при которой потери реактивности будут минимальны (кривая 3) при том же воздействии на  $N_{max}$ . Как показали расчеты, для ТК РБМК оптимальная концентрация поглотителя соответствует плотности  $Gd_2O_3$  0,4–0,5 г/см<sup>3</sup> и почти не зависит от диаметра стерженьков при его изменении в диапазоне 3–12 мм. Начальное влияние стерженьков на реактивность и мощность ТК в основном определяется их диаметром. Оно увеличивается с ростом диаметра.

В условиях непрерывных перегрузок ТК и выгорающих поглотителей диаметр стерженьков

\* Такой метод расчета впервые авторы использовали в 1966 г. при проектировании первой загрузки реактора второго блока БАЭС. Эксперименты во время физического пуска подтвердили основные результаты расчетов.



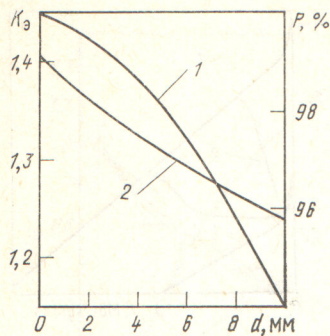


Рис. 2. Влияние диаметра поглощающего стерженька на выгорание урана ( $P$ ) и коэффициент неравномерности энергораспределения ( $K_3$ )

с оптимальной концентрацией поглотителя однозначно определяет такие взаимно связанные харак-

теристики, как  $N_{\text{макс}}$ , время выгорания стерженьков  $t_0$  и выгорание урана  $P$ . Чем больше диаметр, тем меньше  $N_{\text{макс}}$ ,  $P$  и больше  $t_0$ . Для установления взаимосвязи этих характеристик проводили пространственные расчеты реактора. На рис. 2 приведены зависимости, позволяющие судить о возможности снижения  $N_{\text{макс}}$  и относительном недовыгорании урана при использовании стерженьков разного диаметра в ТК с обогащением 2,6%. Расчеты проводили по разработанной авторами итерационной схеме. В ней в предположении режима непрерывных перегрузок учитывали недовыгорание выгружаемого урана при использовании поглощающих стерженьков. Мощность ТК, содержащего стерженьки, принималась равной  $N_{\text{макс}}$  и не изменялась до полного выгорания последних. Это позволяло определить кампанию ТК,  $t_0$ , а значит, и долю ТК, содержащих поглощающие стерженьки, т. е. сформировать полирешетку реактора, из расчета которой находили  $N_{\text{макс}}$ .

Расчеты, проведенные с учетом разного диаметра стерженьков и обогащения догружаемого урана, показали возможность максимального повышения его обогащения при заданном ограничении максимальной мощности ТК в зависимости от диаметра. В качестве ограничения удобнее использовать коэффициенты неравномерности энергораспределения  $K_3$  или перегрузки  $K_{\text{пер}}$ , а не  $N_{\text{макс}}$ . Как следует из рис. 3, несмотря на некоторые потери в выгорании урана из-за дополнительного поглощения нейтронов за счет применения стерженьков заметно увеличивается его обогащение и выгорание. Естественно, что в этом случае

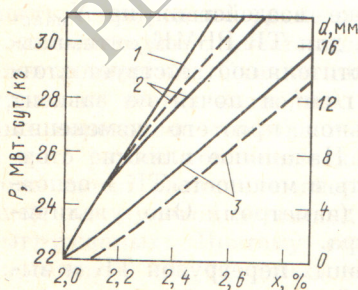
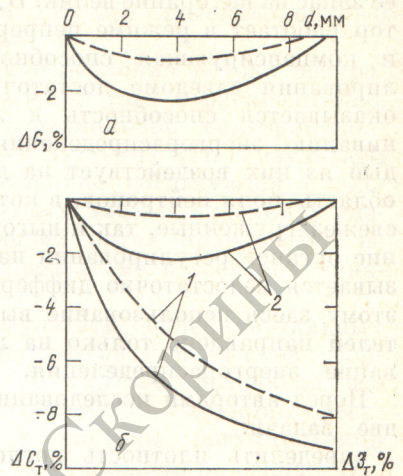


Рис. 3. Зависимость выгорания выгружаемого урана от его обогащения  $x$  при отсутствии ограничения ( $1$ ) и наличии ограничения ( $2$ ) на  $N_{\text{макс}}$ , обеспечиваемую соответствующим диаметром поглощающих стерженьков ( $3$ ).  $K_{\text{пер}} = 1,27$  и  $1,3$  соответственно

Рис. 4. Влияние диаметра поглощающего стерженька на относительное изменение показателей топливного цикла:  $a$  — расход природного урана  $G$ ;  $b$  — топливная составляющая себестоимости электроэнергии  $C_T$  ( $1$ ) и приведенных затрат  $Z_T$  ( $2$ ).  $K_{\text{пер}} = 1,27$  и  $1,3$  соответственно



урана выгорает меньше, чем при отсутствии ограничения (кривые  $1, 2$ ).

Эти результаты характеризуют только техническую сторону повышения обогащения и выгорания урана и их еще недостаточно для однозначного вывода об экономической целесообразности применения поглощающих стерженьков. Нужны данные об экономических и натуральных показателях топливного цикла. Для этого в зависимости от диаметра стерженьков рассчитывали относительное изменение топливных составляющих себестоимости электроэнергии и приведенных затрат на выработку электроэнергии и удельного расхода урана, необходимого для ежегодной подпитки реактора. Результаты расчетов показывают (рис. 4), что в РБМК-1500 и РБМКП целесообразно применять поглощающие стерженьки диаметром до 10 мм. Наибольший технико-экономический эффект достигается при использовании стерженьков диаметром 4—6 мм, что весьма существенно с практической точки зрения, поскольку позволяет их устанавливать в изготавливаемые сейчас ТВС без каких-либо изменений конструкции. Причем эффект тем больше, чем жестче ограничение на неравномерность энергораспределения. Так, при  $K_{\text{пер}} = 1,27$  топливные составляющие себестоимости энергии и приведенных затрат на выработку электроэнергии могут быть снижены на 7—8 и ~2% соответственно, природного урана расходуется на 2—2,5% меньше.

Наконец, интересно отметить некоторые результаты расчетного исследования влияния поглощающих стерженьков на пространственно-энергетическое распределение тепловых нейтронов в ячейке ТК. Это влияние, изученное с использованием программы НЕКТАР [9], оказалось незначительным (см. таблицу), что позволило упростить расчеты выгорания стерженьков и подготовку двугрупповых констант. В частности, оказалось возмож-



Распределение потоков тепловых нейтронов  $\Phi^*$  (отн. ед.) и температуры нейтронного газа  $T_{н.г}$  (К) в ячейке ТК в зависимости от диаметра поглощающих стерженьков (плотность  $Cd_2O_3$  0,45 г/см<sup>3</sup>)

d, мм	Твэлы **		Вода		Труба канала		Графит	
	$\Phi$	$T_{н.г}$	$\Phi$	$T_{н.г}$	$\Phi$	$T_{н.г}$	$\Phi$	$T_{н.г}$
0	0,598	858	0,668	762	0,805	811	1,039	847
	0,511	848						
4	0,590	861	0,652	767	0,800	812	1,041	848
	0,484	856						
6	0,586	862	0,644	768	0,799	813	1,042	849
	0,471	860						
10	0,580	863	0,633	770	0,796	814	1,043	849
	0,449	862						

\* Приведены средние по объему указанных элементов значения потоков, нормированных на среднее по объему ячейки значение.

\*\* Данные в числителе относятся к 12 наружным твэлам, в знаменателе — к 6 внутренним.

ным применять односкоростную программу ВОР, к сечениям которой вводились необходимые термализационные поправки. Деформация распределения нейтронов вследствие применения стержень-

ков может вызвать относительное повышение мощности твэлов наружного ряда ТВС, однако при диаметре 5—6 мм оно составляет не более 2%.

Приведенные результаты справедливы для использования и других самоэкранированных поглотителей тепловых нейтронов, содержащих, например <sup>113</sup>Cd или <sup>149</sup>Sm.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов И. Я. и др. Атомная энергия, 1979, т. 46, вып. 3, с. 139.
2. Доллежал Н. А., Емельянов И. Я. Канальный ядерный энергетический реактор. М., Атомиздат, 1980.
3. Булкин Ю. М. и др. В кн.: Опыт эксплуатации и пути дальнейшего развития атомной энергетики. Обнинск, изд. ФЭИ, 1974, т. 2, с. 28.
4. Радковский А. В кн.: Труды II Женевск. конф. Избр. докл. иностр. ученых. Т. 3. М., Атомиздат, 1959, с. 717.
5. Волков В. С. и др. Атомная энергия, 1961, т. 11, вып. 2, с. 109.
6. Тошинский Г. И., Калайников А. Г. — В кн.: Теория и методы расчета ядерных реакторов. М., Госатомиздат, 1962, с. 118.
7. Орлов В. В. и др. III Женевск. конф., 1964, докл. СССР № 354.
8. Городков С. С. Инструкция по пользованию программой расчета гетерогенных реакторов HODINER. Препринт ИАЭ-2578. М., 1975.
9. Викулов В. К. и др. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерная физика низких и средних энергий, реакторная физика, 1977, вып. 5, с. 57.

Поступила в Редакцию 13.02.81

УДК 621.039:532.54

## Поканальный теплогидравлический расчет сборок твэлов ядерных реакторов

ЖУКОВ А. В., СОРОКИН А. П., УШАКОВ П. А., ЮРЬЕВ Ю. С.

Процессы формирования полей скорости и температуры в сборках твэлов имеют существенные особенности по сравнению с изолированными каналами [1—4]. На структуру полей значительное влияние оказывает происходящий в сборках обмен теплом и массой, обусловленный, в частности, дистанционирующими проволочными навивками на твэлах. Учет этого фактора обусловил развитие поканального метода расчета полей скорости и температуры.

Согласно этому методу сборку твэлов разбивают на ряд параллельных каналов (рис. 1), для которых решают систему уравнений баланса массы, количества движения и энергии, в результате чего получают распределение скорости и подогрева теплоносителя.

Системы уравнений баланса, формулируемые различными авторами, различаются по степени учета и точности описания физических эффектов и механизмов межканального взаимодействия. В зависимости от этого, как показано в работе [5], расчетные программы могут быть развиты, по

крайней мере, на 4 группы. В программах первой и четвертой групп процессы гидродинамики рассматриваются в приближении стабилизированного режима течения. В программах четвертой группы учитывается теплообмен через обечайки, что позволяет анализировать влияние на температурное поле межкассетной протечки теплоносителя и неравномерности энергораспределения в зоне. Программы второй и третьей групп рассчитывают нестabilизированные процессы гидродинамики с граничными условиями на входе или выходе сборки. Это позволяет учесть влияние на поля входных эффектов, изменения сечения сборки и т. п.

В то же время анализ системы уравнений баланса обычно далеко не полон. Так, в работах [6, 7] дается только общее представление о процессах обмена в сборках и возможности приближенных формулировок поканального метода. В работе [8], хотя и представлен обзор численных методов решения системы уравнений баланса, не проведен анализ математической постановки задачи. В связи с этим возникает необходимость более строгой