

ные распределения активности медной проволоки и показаний зонда ТНД-А с термонейтронными датчиками в бериллиевом блоке и ТВС имеют одинаковый характер и совпадают в пределах погрешностей измерений. В водяной ловушке результаты несколько отличаются. Это отличие можно объяснить разной спектральной чувствительностью медного индикатора и термонейтронного датчика, а также недостаточной центровкой зонда в водяной ловушке (коэффициент неравномерности распределения плотности потока тепловых нейтронов по радиусу водяной ловушки $\sim 1,2$). Аналогичный эффект наблюдался и в работе [7].

Полученные результаты позволяют рекомендовать зонд с термонейтронными датчиками для оперативного внутриреакторного контроля распределения плотности потока тепловых нейтронов в диапазоне от $5 \cdot 10^{10}$ до $\sim 10^{14}$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$.

Поступило в Редакцию 6.III.78

УДК 621.039.517.5

Двумерное профилирование топливных сборок высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов

СЕГАЛЬ М. Д., ХРИПУНОВ В. И.

В настоящее время большое значение для энергетики и получения высокопотенциального тепла начинают приобретать высокотемпературные ядерные реакторы, охлаждаемые газовым теплоносителем (ВТГР) [1]. Такие реакторы характеризуются относительно высокой теплонапряженностью в сочетании с длительным ресурсом и жесткими требованиями к предельной температуре топлива. В связи с этим весьма важным представляется выравнивание температурных полей твэлов и рабочего тела, что особенно существенно для реакторов кластерного типа.

В топливных сборках таких реакторов, состоящих из большого числа стержневых твэлов, возможно возникновение пространственной неравномерности поля тепловыделения вследствие блок-эффекта, возмущений, внешних органами регулирования, и т. п. Неравномерность приводит к возникновению локальных перегревов рабочего тела и топлива и, следовательно, к снижению параметров топливной сборки. Перспективным для повышения выходных параметров таких сборок является двумерное профилирование поля энерговыделения концентрацией топлива. Естественно, что речь идет только о зонном профилировании, поскольку индивидуальный подбор концентраций топлива для каждого твэла является, по-видимому, нетехнологичным (в реакторе фирмы «Галф дженерал атомик» (США) используются сборки, включающие 270 твэлов). Методы физического профилирования, рассмотренные в работе [2], нашли дальнейшее развитие и экспериментальное обоснование в работах [3—5]. Была выявлена возможность весьма сильного воздействия изменения концентрации и соотношения объемов топлива и замедлителя на распределение источников энерговыделения в разных системах. Во многих случаях условие сохранения постоянной температуры поверхности или центра твэла сводится к выравниванию плотности энерговыделения по объему.

Решение задач об оптимизации этих параметров по реактору в целом базируется на некоторых упрощаю-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

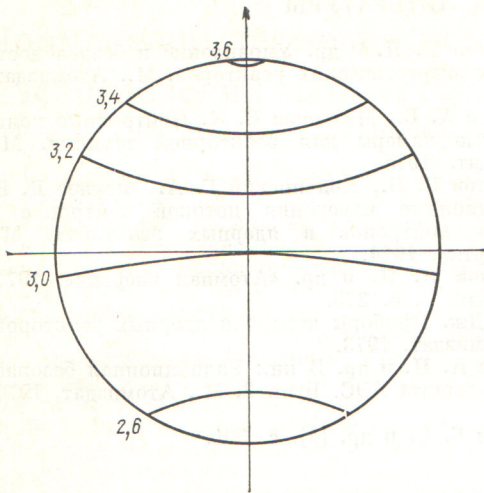
1. Емельянов И. Я. и др. Управление и безопасность ядерных энергетических реакторов. М., Атомиздат, 1975.
2. Дмитриев А. Б., Малышев Е. К. Нейтронные ионизационные камеры для реакторной техники. М., Атомиздат, 1975.
3. Климентов В. Б., Колчинский Г. А., Фрунзе В. В. Активационные измерения потоков нейтронов и спектров нейтронов в ядерных реакторах. М., «Стандарты», 1974.
4. Емельянов И. Я. и др. «Атомная энергия», 1974, т. 30, вып. 3, с. 275.
5. Боланд Дж. Приборы контроля ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1973.
6. Зырянов А. П. и др. В кн.: Радиационная безопасность и защита АЭС. Вып. 2. М., Атомиздат, 1976, с. 110.
7. Ломакин С. С. и др. [4], с. 301.

щих предложениях (одномерная геометрия, малогрупповой подход и т. п.). Вместе с тем при профилировании топливной сборки необходимо учитывать процессы перемешивания рабочего тела, а также локальные особенности энергораспределения. Подход, описываемый в данной работе, основан на совместном использовании многомерного нейтронно-физического расчета методом Монте-Карло [6] и теплогидравлического расчета [7], что позволило достаточно эффективно выравнивать температурное поле твэлов и газа-теплоносителя. Температурные поля рассчитывались в трехмерной геометрии для гомогенизированной тепловыделяющей среды по программе, приведенной в работе [8], на ЭВМ БЭСМ-6.

Для фиксации пространственного энергораспределения в неоднородной среде в рамках метода Монте-Карло была предложена локальная оценка потока в протяженных (нитевидных) математических детекторах. При каждом соударении нейтрона в объеме системы вклад в энерговыделение пропорционален интегралу

$$q \sim (1/A) \int_0^X \exp(-\sqrt{x^2+A^2})/\sqrt{x^2+A^2} dx, \quad (1)$$

где q — вклад в энерговыделение от рассеяния нейтрона в точке; A — оптическое расстояние детектора от точки рассеяния нейтрона; X — оптическая длина детектора. Некоторые свойства этой оценки (однопараметрическая зависимость от A , обусловленная быстрой сходимость по верхнему пределу) позволяют в коррелированном расчете для большого числа детекторов снизить погрешность локальной оценки энерговыделения в r, φ -геометрии до 3—5%. Соотношение концентрации топлива в зонах профилирования выбиралось исходя из равенства средних значений энерговыделения в каж-



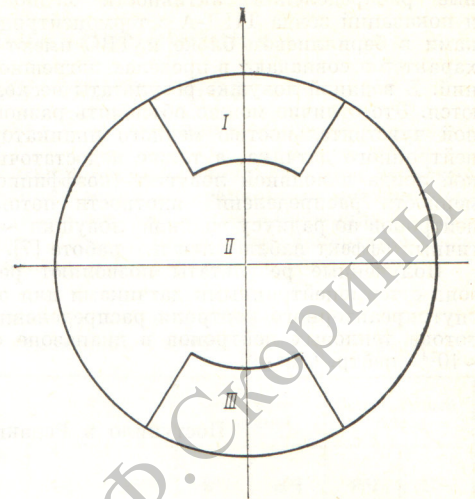
Р и с. 1. Изолинии энерговыделения в условных единицах для непрофилированной топливной сборки

дой зоне с учетом ограничения по предельно допустимой температуре топлива согласно равенству

$$\int_{S_i} \int_E C_i(E) \Phi_i(r, \varphi, E) dE dS_i / \int_{S_i} \int_E \Phi_i \times (r, \varphi, E) dE dS_i = \text{const}, \quad (2)$$

где S_i — площадь зоны профилирования; E — энергия нейтронов; C_i — концентрация топлива в зоне профилирования; Φ_i — поток нейтронов в зоне профилирования.

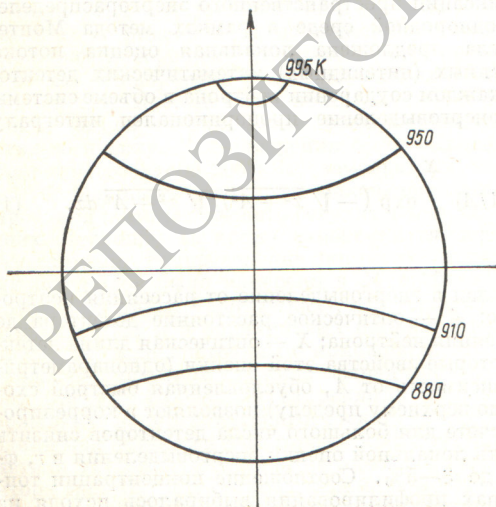
Следует отметить, что для сборок с большими градиентами поля энерговыделения желательно профилировать исходя из равенства максимальных значений энерговыделения в зонах профилирования. Наиболее важным является выбор числа и конфигураций зон про-



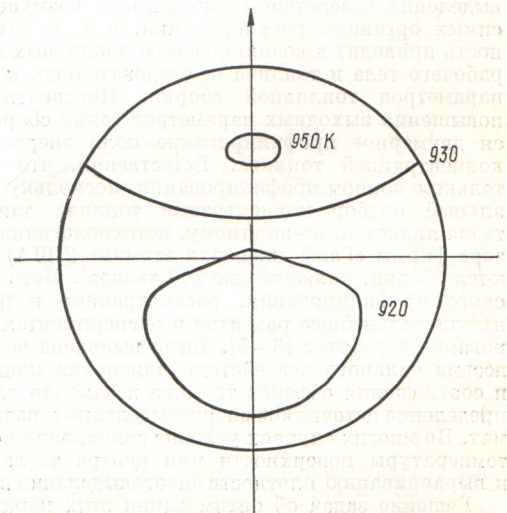
Р и с. 3. Зоны профилирования

филирования. По известному полю энерговыделения для фиксированного числа концентрации топлива в твэле методом линейного программирования, описанным в работе [9], выбиралась конфигурация зон. При этом минимизировался коэффициент неравномерности энерговыделения по сечению зон профилирования. С учетом локальных особенностей энергораспределения и гидродинамики окончательно корректировалась конфигурация зон и соотношение концентрации топлива в них.

Применяя вариационную теорию, предложенную в работе [10] к задаче об оценке энерговыделения, можно показать, что поправка к точному значению при изменении конфигурации зон профилирования является величиной второго порядка малости. В ходе численного эксперимента потребовались лишь две итерации,



Р и с. 2. Изотермы газа на выходе из непрофилированной сборки



Р и с. 4. Изотермы газа на выходе из профилированной сборки

чтобы погрешность в распределении энерговыделения не превосходила 2—3%.

В качестве иллюстрации предлагаемого метода рассмотрено профилирование топливного канала с гипотетическим полем энерговыделения.

Характеристика канала	
Мощность, МВт	1,5
Гелий:	
расход, кг/с	0,85
температура на входе, °С	300
Число твэлов в кассете	270
Диаметр твэла, мм	7,2

Гипотетическое поле энерговыделения приведено на рис. 1, соответствующие ему изотермы газа на выходе — на рис. 2. С помощью трех концентраций топлива было осуществлено профилирование этого канала. Конфигурация зон профилирования приведена на рис. 3. На рис. 4 показаны соответствующие новому полю энерговыделения изотермы газа на выходе. Соотношение концентраций топлива в зонах следующее: $C_I/C_{II}/C_{III} = 0,848/1/1,19$. Таким образом, неравномерность выходного поля температуры газа уменьшилась с 1,27 до 1,13 (по подогреву). Это позволяет увеличить мощность топливной сборки почти на 10%.

Следует отметить, что предложенный метод устраняет радиальную и азимутальную неравномерность энерговыделения. Причем число твэлов с различной концентрацией топлива не больше, чем в случае радиального профилирования.

Поступило в Редакцию 13.III.78

УДК 543.52+614.73

О допустимой мощности выбросов к обоснованию нормирования и контроля долгоживущих гамма-излучающих аэрозолей с АЭС

ДОРОШЕНКО Г. Г., ЛЕОНОВ Е. С., ЛЯПИНА З. Е., ФЕДОРОВ В. А., ШЛЯГИН К. Н.

Натурные измерения ^{60}Co в почве в окрестностях НВАЭС дали следующее распределение его удельной активности по радиусу: 5; 4; 2; 1; 0,5 мКи/км² для расстояний 0,5; 1; 2; 3; 5 км соответственно. Оценка полной его активности в радиусе 5 км, полученная интегрированием, составила 97 мКи [1]. Это согласуется с результатом (113 мКи) измерений суммарного выброса за 10 лет эксплуатации НВАЭС с учетом физического распада ^{60}Co .

Измерением постоянных проб оценено распределение ^{60}Co по глубине залегания в почве. Оно приближенно описывается экспонентой с показателем $K = 0,5 \text{ см}^{-1}$. Эти данные позволили рассчитать мощность экспозиционной дозы на расстоянии $h = 1 \text{ м}$ от поверхности земли по формуле, приведенной в работе [2]:

$$P(E_0, h, K) = 1,44 \cdot 10^3 E_0 \gamma \nu f(E_0, h, K) F, \quad (1)$$

где E_0 — энергия фотона, МэВ; γ — коэффициент электронного преобразования, см^{-1} ; ν — квантовый выход, γ -квант/расп.; F — удельная активность, мКи/км²; f — табулированная функция.

Рассчитанная мощность дозы P для указанных выше точек равна 0,86; 0,69; 0,34; 0,17; 0,086 мрад/год, что

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бедениг Д. Газоохлаждаемые высокотемпературные реакторы. Пер. с нем. М., Атомиздат, 1975.
2. Винтерберг Ф. В кн.: Труды II Женевск. конф. Докл. ФРГ № 1055. М., Атомиздат, 1959, с. 453.
3. Пономарев-Степной Н. Н., Глушков Е. С. «Атомная энергия», 1961, т. 11, вып. 1, с. 19; 1962, т. 12, вып. 5, с. 415; 1966, т. 20, вып. 6, с. 478.
4. Пономарев-Степной Н. Н., Глушков Е. С., Носов В. И., Барков С. Н. Там же, 1970, т. 28, вып. 1, с. 58.
5. Рудик А. П. Оптимальное расположение ядерного горючего. М., Атомиздат, 1974.
6. Марковский Д. В., Хрипунов В. И., Шаталов Г. Е. Многогрупповой расчет гетерогенных реакторов методом Монте-Карло. Препринт ИАЭ № 2959. М., 1977.
7. Сегаль М. Д. Расчет температурных полей в $r_1\phi_{12}$ -геометрии в пористых средах с пространственной неравномерностью тепловыделения. Препринт ИАЭ № 2845. М., 1977.
8. Сегаль М. Д. Краткое описание и инструкция к программе расчета полей температур и скорости. Препринт ИАЭ № 2785. М., 1977.
9. Tzanos С. «Trans. Amer. Nucl. Soc.», 1976, v. 24, p. 195.
10. Белл Д., Глестон С. Теория ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1974.

меньше 1% естественного радиационного фона для этого района [3].

На основе экспериментальных данных и в предположении постоянства распределения удельной активности $F(R)$ при различной накопленной активности Q_0 построена номограмма (см. рисунок), в которой суточный выброс q связан с равновесным количеством полной активности соотношением

$$Q_0 = qT_{1/2}/\ln 2. \quad (2)$$

Из номограммы следует, что в случае, если выброс обусловлен только ^{60}Co , допустимая мощность выброса долгоживущих аэрозолей 0,5 Ки/сут [4] приводит к неоправданно высоким дозам на местности вблизи АЭС. Реальные уровни выбросов НВАЭС соответствуют 0,04 мКи/сут и максимальная мощность дозы на местности не превышает 1 мрад/год на расстоянии 0,5 км от АЭС. На этой основе предлагается установить рабочий уровень допустимой мощности выброса ^{60}Co с АЭС таким, чтобы его равновесная активность не превышала 100 мКи, т. е. количества, накопленного во внешней среде вблизи НВАЭС. Так как измерять малую допустимую мощность выброса трудно и нет необходимости