

РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОСТИ ^{60}Co ПРИ ПРОМЫШЛЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ НА ЛЕНИНГРАДСКОЙ АЭС

Артемов В.Г., Ельшин А.В., Иванов А.С. (НИТИ им. А.П. Александрова, Сосновый Бор, Ленинградская обл.), Горбунов Е.К., Иконников Р.В., Пименов А.Н. (Филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Ленинградская атомная станция», Сосновый Бор, Ленинградская обл.)

Для производства ^{60}Co в активной зоне РБМК-1000 Ленинградской АЭС используют специально спроектированные облучательные устройства с мишенями из изотопа-предшественника ^{59}Co . Активность выгружаемого изотопа, которую необходимо знать при производстве, определяют с помощью комплекса программ САФИР_95&RC_РБМК-РТ [1, 2]. Его отличительной особенностью является:

аттестованный код САФИР_95 для расчета ячеек активной зоны;

отказ от восстановления расчетного энерговыделения с использованием показаний датчиков системы контроля радиального и аксиально-го энерговыделения.

Результаты сравнения расчетной и экспериментальной активности кобальта в выгружаемых облучательных устройствах приведены в работах [3, 4].

В настоящее время в программе RC_РБМК расчета реактора уточнен блок определения теплофизических характеристик, с помощью которого в модели вычисляют распределение плотности теплоносителя по высоте канала, температуру топлива по высоте ТВС, графита (среднюю по сечению) по высоте канала. Поскольку плотность теплоносителя сильно меняется по высоте канала, а это, в свою очередь, влияет на выгорание топлива, накопление плутония и, следовательно, энерговыделение по высоте ТВС, в расчетной модели учитываются условия выгорания топлива в нижней, средней и верхней частях активной зоны. Для этого активная часть ТВС делится на три физические зоны (по 2—2,5 м каждая) по высоте. Базовый расчет выгорания топлива при этом выполняется при разной плотности теплоносителя 0,8, 0,5, 0,2 г/см³ соответственно.

Настоящая статья посвящена влиянию уточнений на расчетную активность кобальта.

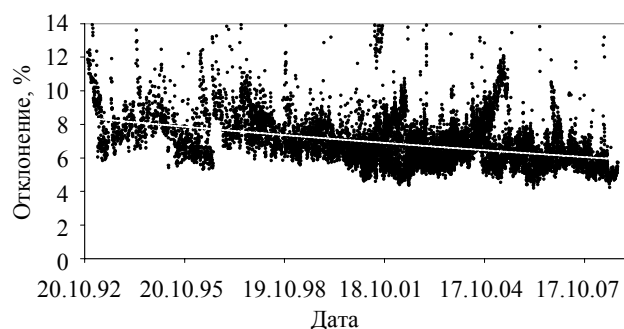
Сравнение расчетной и экспериментальной мощности и энерговыработки ТВС. В работе [4] описаны алгоритм и программы для расчетного сопровождения производства кобальта и выгорания топлива. При сравнении

рис. 1 и аналогичного рис. 2 из работы [4] (до 2006 г.) трудно отдать предпочтение какой-либо модели. Экспоненциальная аппроксимация данных, например, для четвертого блока, имеет один и тот же показатель (рис. 2, модель из работы [4] будет считаться стандартной).

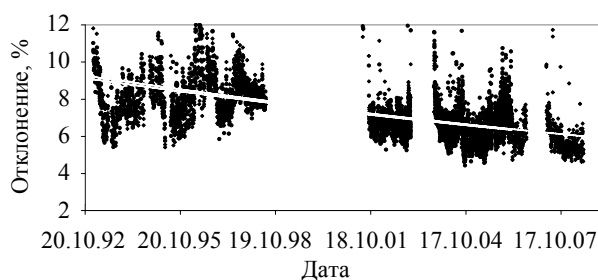
Аналогичная ситуация и с энерговыработкой ТВС (рис. 3, 4).

Влияние модели (введение трех зон по высоте) должно сказаться на высотных профилях энерговыделения и, естественно, активности кобальта.

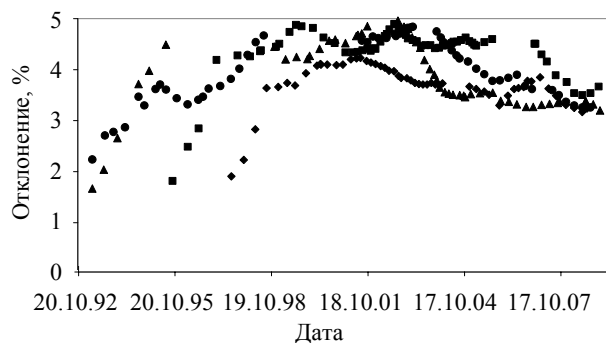
Сравнение экспериментальной и расчетной активности кобальта. В настоящее время на всех блоках Ленинградской АЭС эксплуатируется более 100 облучательных устройств. Облучательное устройство представляет собой сборку, состоящую из 16 звеньев (по два звена без кобальтовых ампул сверху и снизу и 12 звеньев с кобальтовыми ампулами в центре). Каждое звено с кобальтовыми ампулами представляет собой конструкцию из шести пеналов,



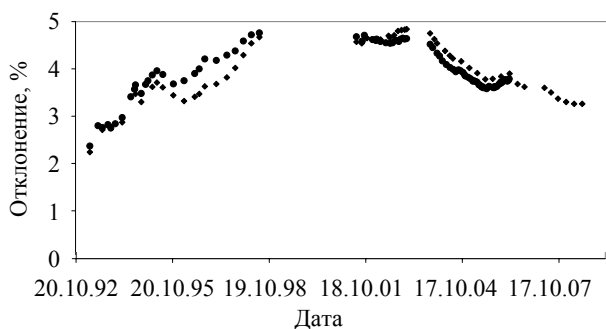
Р и с. 1. Среднеквадратичное отклонение расчетной мощности ТВС от измеренной системой СКАЛА на всех блоках



Р и с. 2. Среднеквадратичное отклонение расчетной мощности ТВС от измеренной системой СКАЛА на четвертом блоке Ленинградской АЭС по стандартной (●) и усовершенствованной (с тремя зонами по высоте) модели (♦)



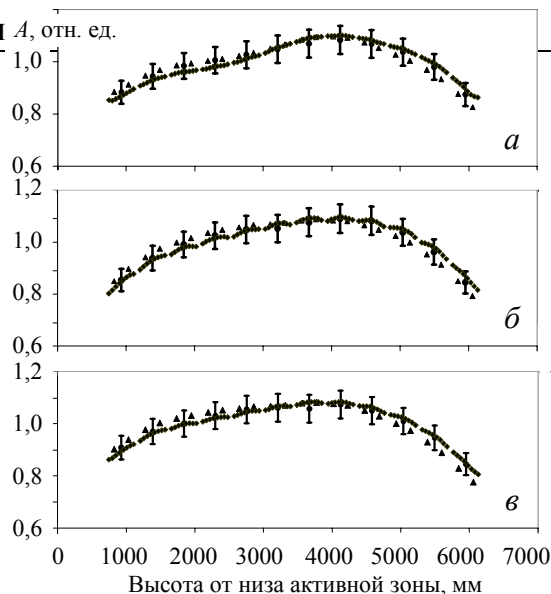
Р и с. 3. Среднеквадратичное отклонение расчетной энерговыработки ТВС от измеренной системой СКАЛА: $\blacklozenge$, $\blacksquare$, $\blacktriangle$, $\bullet$ — 1—4-й блок соответственно



Р и с. 4. Среднеквадратичное отклонение расчетной энерговыработки ТВС от измеренной системой СКАЛА на четвертом блоке Ленинградской АЭС по стандартной ($\bullet$) и усовершенствованной (с тремя зонами по высоте) модели ($\blacklozenge$)

расположенных между верхней и нижней решеткой. В пенах размещаются ампулы с таблетками кобальта. В настоящее время эксплуатируются три типа облучательных устройств, отличающихся расположением стартового материала: ампулы с таблетками кобальта, размещаемые во всех шести или в трех из шести пеналов, ампулы с таблетками кобальта попеременно с таблетками из циркония во всех шести пеналах.

Для расчета активности кобальта разработано объединяющее основные расчетные программы и программы-интерфейсы приложение, которое осуществляет взаимодействие с системой СКАЛА, базой данных «Архив ТВС», подготавливает исходные данные, обрабатывает выходные данные для табличного или графического представления. С помощью приложения можно рассчитывать активность ^{60}Co и при сложных режимах облучения: перегрузка облучательного устройства из одной ячейки в другую, с одного энергоблока на другой. Например, расчетные и экспериментальные данные на



Р и с. 5. Сравнение с экспериментом ($\bullet$) расчетной относительной удельной активности ^{60}Co в облучательном устройстве № А54, 37, 95 первого (а), второго (б), третьего типа (в) второго, четвертого, третьего блока при наработке 1309, 1376, 1134 эф. сут соответственно по стандартной ($\blacktriangle$) и усовершенствованной модели ($\blacklozenge$)

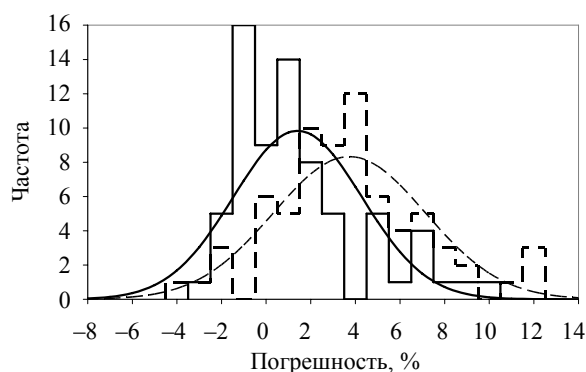
рис. 5, б приведены для устройства, которое сначала облучали на втором энергоблоке в течение 768 сут, затем на четвертом энергоблоке.

Введение в модель трех физических зон по высоте ТВС повышает расчетную активность кобальта в верхней части облучательного устройства и понижает в нижней. Это приводит к лучшему согласию активности кобальта с экспериментальными данными. Во всех случаях расчетная форма кривой хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Расчет абсолютной активности кобальта.

Для принятия решения о выгрузке облучательного устройства важно знать как среднюю активность кобальта, так и ее распределение по высоте для определения порядка разборки устройства и загрузки ампул в транспортный контейнер. Погрешность экспериментального определения активности кобальта оценивается 10% при доверительной вероятности 0,95.

На конец 2008 г. выгружено более 73 облучательных устройства — 55 первого типа, 18 второго и третьего типов с меньшей загрузкой кобальта. На рис. 6, где показана частота попадания погрешности расчета средней активности кобальта в диапазон $\pm 0,5\%$, вообще говоря, не видно большого преимущества введения трех зон по высоте ТВС.



Р и с. 6. Распределение отклонений расчетной активности от эксперимента по стандартной (---) и усовершенствованной модели (—)

Погрешность расчета средней активности ^{60}Co в 55 облучательных устройствах первого типа распределена почти по нормальному закону (рис. 7). Видно также преимущество модели с тремя физическими зонами по высоте ТВС («колокол» уже). Для облучательных устройств двух других типов, видимо, требуется уточнение модели, так как наблюдается систематическое завышение 6—8% по сравнению с экспериментом. Тем не менее расчетные результаты, полученные по модели с тремя физическими зонами по высоте, укладываются в экспериментальную погрешность.

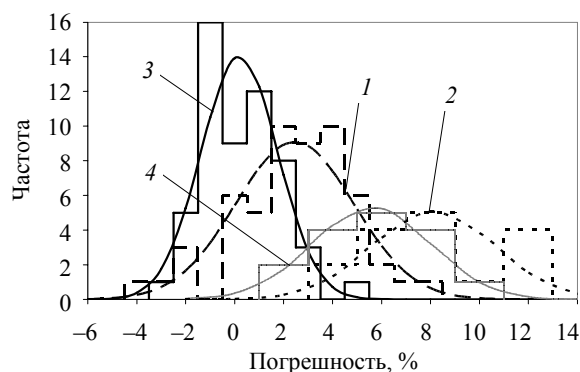
Сравнение расчетной и экспериментальной активности ^{60}Co показывает, что модель надежно предсказывает накопление кобальта в загруженных в активную зону РБМК облучательных устройствах. Расчетная модель с тремя физическими зонами по высоте ТВС более корректно описывает активность ^{60}Co по высоте, имеет преимущество в определении абсолютной активности. В настоящее время с помощью расчетной модели:

определяется текущая активность ^{60}Co ;

оценивается время облучения для достижения необходимой активности ^{60}Co для различных конструкций облучательных устройств;

принимается решение о выгрузке облучательных устройств;

рассчитывается распределение активности ^{60}Co по высоте, что позволяет заранее планировать последовательность разборки облучатель-



Р и с. 7. Распределение отклонений расчетной активности ^{60}Co в облучательном устройстве первого (1), второго и третьего типа (2) по стандартной и усовершенствованной модели (3, 4 соответственно)

ного устройства и загрузки ампул в транспортный контейнер.

Авторы благодарят Л.М. Артемову за необходимое для статьи решение теплофизических вопросов, В.В. Дмитриева за предоставление данных об активности кобальта в выгруженных облучательных устройствах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артемов В.Г., Ельшин А.В., Иванов А.С. и др. Математическое моделирование производства ^{60}Co в облучательных устройствах реакторов РБМК Ленинградской АЭС. — В сб.: Межд. научно-техн. конф. «Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных, электронных и лазерных технологий». Москва—Сочи, 2001, ч. 2, с. 29—31.
2. Программа САПФИР_95. Ат. паспорт программного средства № 116 от 02.03.2000, НТЦ ЯРБ Ростехнадзора.
3. Artemov V., Elshin A., Gorbunov E. et al. Calculation support for industrial production of cobalt-60 at Leningrad NPP. — In: Intern. Conf. on the Physics of Reactors «Nuclear Power: a Sustainable Resource». Switzerland, 2008, September 14—19, p. 127.
4. Артемов В.Г., Ельшин А.В., Иванов А.С. и др. Модель активной зоны РБМК для расчетного сопровождения производства ^{60}Co на Ленинградской АЭС. — Атомная энергия, 2010, т. 108, вып. 1, с. 43—46.

Поступила в Редакцию 16.06.09