

удельные загрузки быстрых реакторов плутонием и темп накопления избыточного плутония в них.

Дефицит урана при дальнейшем развитии ЯЭ может привести к тому, что быстрые реакторы-размножители будут нарабатывать топливо и для тепловых реакторов, хотя нельзя исключать и дополнительного поступления ядерного топлива в систему за счет его наработки, например, в гибридных термоядерных реакторах.

Если в развитой ЯЭ, состоящей из тепловых реакторов, а также из реакторов-размножителей, обеспечивающих развитие ЯЭ за счет накопления избыточного ядерного топлива, установится динамическое равновесие с соотношением быстрых и тепловых реакторов N_6/N_T , то темп развития ω и время удвоения $T_2^{ЯЭ}$ такой системы могут быть определены с использованием выражений из работы [1]:

$$T_2^{ЯЭ} = \frac{\ln 2}{\omega} = \ln 2 \frac{(N_6/N_T) g_6 + g_T}{(N_6/N_T) r_6 - q_T}, \quad (1)$$

где r_6 и g_6 — удельные темп избыточного воспроизводства и нагрузка реактора-размножителя (т. е. отнесенные на единицу мощности); q_T и g_T — удельные темп подпитки топливом и нагрузка теплового реактора.

Разрешив это соотношение относительно N_6/N_T , получим выражение, позволяющее вычислять необходимое соотношение реакторов и тепловых реакторов в зависимости от заданного темпа развития системы реакторов и их параметров:

$$\frac{N_6}{N_T} = \frac{q_T + \omega g_T}{r_6 - \omega g_6}. \quad (2)$$

Исходные характеристики реакторов влияют на время удвоения и структуру (N_6/N_T) двухкомпонентной системы. Зафиксируем параметры теплового реактора, имея в виду ВВЭР-1000 [2]. Для примера рассмотрим быстрый реактор тепловой мощностью 3000 МВт типа БН на окисном топливе с теплонапряженностью активной зоны Q от 300 до 800 кВт/л (рис. 1, а). Такой реактор, оптимальный по собственному времени удвоения T_2^6 , характеризуется средней теплонапряженностью 450–550 кВт/л. При уменьшении Q происходит увеличение удельного темпа избыточного воспроизводства r_6 и удельной загрузки g_6 . Рост g_6 не компенсируется ростом r_6 , что приводит к увеличению T_2^6 . Если ЯЭ состоит из быстрых и тепловых реакторов, то оптимум по $T_2^{ЯЭ}$ сдвигается в область меньшей теплонапряженности быстрых реакторов. Чем больше в системе тепловых реакторов, тем меньшие значения теплонапряженности соответствуют минимальным значениям $T_2^{ЯЭ}$.

На рис. 1, б представлены аналогичные результаты для реактора-размножителя с металлическим топливом.

Полученные результаты иллюстрируют тот факт, что в двухкомпонентной системе ЯЭ, находящейся в состоянии динамического равновесия, оптимальный реактор должен иметь иные конструктивные параметры активной зоны по сравнению с реактором, оптимизированным по T_2^6 , — в системе, состоящей только из реакторов-размножителей одного типа. Смещение оптимума $T_2^{ЯЭ}$ в сторону меньших Q означает, что для системы предпочтительнее быстрые реакторы, имеющие больший коэффициент воспроизводства, хотя при этом удельная нагрузка оказывается больше. Однако увеличение загрузки при этом не должно быть чрезмерным, т. е. важно, чтобы в формуле (2) при одновременном возрастании r_6 и g_6 разность $r_6 - \omega g_6$ увеличивалась. Можно заметить, что оптимизация реактора-размножителя по топливной составляющей расчетных затрат также приводит к менее напряженным активным зонам, чем того требует оптимальность по T_2^6 [3].

Эти примеры говорят о том, что проектируя быстрый реактор, срок жизни которого должен составлять не менее 30 лет, следует учитывать возможности его приспособления к стадиям развития системы реакторов. Гибкая конструкция активной зоны, допускающая при заданной мощности изменение теплонапряженности, а возможно, и вида топлива, позволит реактору-размножителю с наибольшей эффективностью работать в системе с изменяющимися требованиями. Например, как видно из рисунка, если в быстром реакторе заменить окисное топливо на металлическое с сохранением прежней теплонапряженности активной зоны Q , то такой реактор оказывается близким к оптимальному по темпу развития двухкомпонентной ЯЭ.

Авторы выражают благодарность В. С. Каграманяну за полезные обсуждения затронутых вопросов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов В. В., Шарпов В. Н., Галинин А. Н. В кн.: Опыт эксплуатации АЭС и пути дальнейшего развития ядерной энергетики. Т. I. Обнинск, изд. ФЭИ, 1974, с. 251.
2. Сидоренко В. А. «Атомная энергия», 1977, т. 43, вып. 5, с. 325.
3. Лыткин В. Б., Троянов М. Ф., Новожилов А. П. «Атомная энергия», 1966, т. 21, вып. 5, с. 360.

Поступило в Редакцию 03.07.79

УДК 621.039.524.44

Расчет расхода реакторной воды на очистку теплоносителя кипящих одноконтурных АЭС

ГЕРАСИМОВ В. В., МАРТЫНОВА О. И., КИШЕЛОВА О. Т., КОШЕЛЕВА Т. И.

При разработках водного режима АЭС с кипящими реакторами необходимо определять расход реакторной воды на очистку (продувку) теплоносителя. Подобные расчеты проводят по содержанию как растворимых примесей, так и по продуктам коррозии (ПК) железа, как правило, определяющим производительность очистки реакторной воды.

Основным источником ПК железа, вносимых в циркуляционный контур реактора, служит конденсатопитательный тракт вследствие его разветвленной поверхности. Одновременно с выносом происходит обратный процесс — осаждение взвешенных частиц ПК на поверхности циркуляционного контура, главным образом в застойных зонах. В результате этих процессов нарушается баланс между

поступлением ПК железа в циркуляционный контур реактора и их содержанием в воде этого контура. Таким образом, балансное уравнение по растворимым примесям неприемлемо для расчета расхода воды на очистку теплоносителя по ПК железа. Обобщение опыта эксплуатации кипящих паропроизводительных установок, работающих на ядерном и органическом топливе, позволило количественно оценить процесс осаждения ПК в контуре. В результате правая часть уравнения материального баланса была дополнена еще одним слагаемым, после чего уравнение приняло вид

$$G_{п. в} + G_{п. к} = p C_{пр} M_1 + C_{п} M_2 + C_{пр} V_{п. к} \gamma \omega, \quad (4)$$

где $G_{п. в}$ — количество ПК железа, вносимое с питательной водой (для проектируемых установок рассчитывается по

выносу ПК и по размерам поверхностей конденсатопитательного и парового трактов турбин с учетом эффективности очистки на фильтрах), г/ч; $G_{ц.к}$ — поступление ПК железа с поверхности циркуляционного контура, г/ч; p — расход реакторной воды на очистку (продувку), т/ч; $D_{ц}$ — паропроводимость реактора, т/ч; $C_{пр}$, $C_{п}$ — определяемая концентрация (или нормируемое содержание) ПК железа в реакторной воде и насыщенном паре соответственно; $V_{ц.к}$ — объем циркуляционного контура реактора, м³; γ — плотность воды при нормальных условиях, т/м³; ω — постоянная осаждения ПК железа на поверхность циркуляционного контура реактора, ч⁻¹.

Входящая в приведенное уравнение постоянная ω определяет кинетику осаждения и зависит от теплофизических и гидравлических процессов в теплоносителе. Для определения ω при стационарных и переходных режимах были использованы эксплуатационные и экспериментальные данные, полученные для действующих отечественных энергетических и полупромышленных установок и АЭС с кипящим реактором. Оказалось, что, если отношение объема к поверхности у циркуляционного контура кипящего реактора составляет 0,014—0,054 м, то во всех случаях значение ω одинаково и равно $(53 \pm 8) \cdot 10^{-2}$ ч⁻¹. Найденная таким образом постоянная осаждения автоматически учитывает влияние многих процессов и факторов, в связи с чем может использоваться при проектировании одноконтурных установок типа РБМК, внося при этом погрешность не более $\pm 15\%$.

При стационарных режимах работы установки расход реакторной воды на очистку, зная ω , можно оценить по приведенному уравнению. При переходных режимах работы этот расход воды определяется из условия:

$$p/V\gamma \gg \omega, \quad (2)$$

откуда $p \gg V\omega\gamma$. Одинаковые значения ω для стационарного и переходного режимов работы данной установки позволяют дополнительно проанализировать уравнение (1). Левая часть уравнения для каждого режима работы остается постоянной. В правой части уравнения слагаемое

$C_{п}D_{п}\mu_2$ зависит от рабочих параметров и в какой-то степени от сепарационных устройств. На слагаемое $C_{пр}V_{ц.к}\omega$ не влияет режим работы установки, поскольку значение ω остается неизменным. Следовательно, воздействовать на данное слагаемое не представляется возможным. Остается слагаемое $pC_{пр}\mu_1$, которое и определяет количество ПК железа в объеме контура. При этом можно либо увеличивать расход реакторной воды на установку контурной очистки, что вызовет увеличение капитальных и эксплуатационных затрат, либо увеличивать концентрацию ПК железа в расходуемой для очистки воде. Последнее осуществимо путем изменения мест забора и вывода этой воды. При стационарных режимах работы такими местами являются застойные зоны с относительно низкой скоростью циркуляции, причем может быть осуществлено систематическое «обегание» этих зон.

Весьма существенно (до 50 раз) возрастает концентрация ПК железа в переходные периоды работы, которые должны максимально использоваться для выведения этих продуктов из контура. В данном случае, по-видимому, необходимо увеличивать и расход воды на очистку теплоносителя, поскольку повышенная концентрация ПК в контуре сохраняется непродолжительно ($\sim 2-2,5$ ч). Кроме того, в эти периоды целесообразно искусственно взмучивать ПК, например, изменяя скорость циркуляции путем переключения насосов.

Предлагаемые рекомендации уже учтены в проекте реактора РБМК-1500. В переходные периоды увеличенный объем воды, расходуемой на очистку, должен проходить только через механические фильтры, а объем воды, поступающей на ионообменные фильтры, может оставаться таким же, как при стационарном режиме. Следует подчеркнуть, что значительное количество взвешенных ПК железа в застойных зонах контура объясняется их поступлением с питательной водой, поскольку конденсатоочистка располагается непосредственно после турбины. Одна из мер борьбы заключается в очистке питательной воды на намывных ионообменных фильтрах, отличающихся большей эффективностью и способных работать при повышенной температуре.

Поступило в Редакцию 4.11.77
В окончательной редакции 18.06.79

УДК 621.039.51

Коэффициенты реактивности материалов

в размножающих средах с $K_{\infty} \approx 1$

ДУЛИН В. А., КАЗАНСКИЙ Ю. А., МАМОНТОВ В. Ф.

Использование интегральных характеристик, измеренных на критических сборках, для проверки и корректировки ядерных данных имеет смысл в том случае, если условия эксперимента адекватно описываются расчетной моделью.

Интегральные эксперименты на критических сборках БФС показали [1], что расчет с использованием системы констант БНАБ-70 [2, 3] неудовлетворительно описывает коэффициенты реактивности (КР) типичных поглощающих, рассеивающих и делящихся элементов. Представляло интерес изучить КР в сборках, расчет которых может быть сделан с минимальными погрешностями, обусловленными идеализацией пространственных расчетов. Таким условием удовлетворяли сборки БФС-31-4, 33-2 и 35-1, центральные части которых имели составы, обеспечивающие $K_{\infty} \approx 1$ [4], достаточно большие размеры и сравнительно мало выраженную гетерогенную структуру. Наблюдаемые расхождения эксперимента и расчета в этом случае обусловлены константной составляющей погрешности расчета.

Сборка БФС-35-1 состояла из металлического урана с обогащением 5,61%, являясь повторением сборки

SNEAK-8 [5]. Сборка БФС-33-2 состояла из окиси урана с обогащением 8,35%, в сборке БФС-31-4 окись ²³⁵U была заменена на металлический ²³⁹Pu. Измерения КР проводились в центре сборок с образцами различных размеров. Результаты измерений являются усредненными по гетерогенной структуре сборок в пределах центральной ячейки (4—6 см). На рисунке приведены измеренные КР для образцов из ²³⁹Pu, ¹⁰B и ¹²C различных размеров, которые представлены в виде отношений к КР ²³⁵U нулевых размеров. Анализ отношений КР (ОКР) позволяет исключить ошибки пространственных расчетов и подчеркнуть константную составляющую погрешностей расчета. Размеры образцов на рисунке характеризуются значением $\sigma_0 = 1/nl$, где n — ядерная плотность образца; $l = 4V/S$ — его средний геометрический размер; V — объем; S — поверхность образца.

Расчеты проводились по программе М-26 [6] в P_1 -приближении с использованием системы констант БНАБ-70 и ее модификации ОСКАР-76 [7]. Учитывалось влияние гетерогенной структуры сборок на ОКР [8, 9]. Учет конечных размеров образцов проводился методами, описанными