

шие возможности по воспроизводству плутония. На рис. 2 показана решетка, где все тепловыделяющие сборки, за исключением тех, в которых применяется самое низкое обогащение урана, заменены сборками с плутонием. Экономия в разделительных работах побуждает к замене высокообогащенного урана плутонием, но в то же время гибкость и высокая стоимость изготовления плутониевыхборок диктуют необходимость использования низкообогащенного урана в активной зоне.

Общее распределение энерговыделения показано на рис. 2, откуда видно, что можно получить приемлемое распределение тепловыделения в активной зоне. Радиальный коэффициент неравномерности составляет 1,294, что обычно допускается для реактора PWR.

**Выводы.** Изучение ограничивалось нейтронно-физическим анализом активной зоны со «свежей» загрузкой. С учетом размещения тепловыделяющихборок рассмотренный случай отражает достаточно реальную ситуацию. Трудности, связанные с локальными пиками энерговыделения, могут быть преодолены довольно легко путем применения различного обогащения топлива внутриборок.

Пример загрузки активной зоны плутонием носит гипотетический характер, так как в этой загрузке содержится больше плутония, чем это необходимо в реальных условиях. Расчеты показали, что не существует проблемы распределения тепловыделения по радиусу активной зоны.

Было бы весьма целесообразно продолжить данное изучение с учетом факторов, связанных

с выгоранием ядерного топлива. Однако необходимы некоторые эксперименты, чтобы расчеты на ЭВМ носили более аргументированный характер. Неравномерность распределения энерговыделения будет сглаживаться по мере обеднения ядерного топлива в процессе выгорания.

Важной областью изучения является также определение «веса» регулирующих стержней. Представляется, что изучение вопросов реактивности будет приводить к выявлению более жестких ограничений, чем при учете факторов распределения энерговыделения, сделанном в настоящей работе.

Поступила в Редакцию 4/VII 1975 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Crowther R. e.a. «Trans. Amer. Nucl. Soc.», 1974, v. 18, p. 297.
2. Generic Environmental Statement on the Use of Recycle Plutonium in Mixed-Oxide Fuel in LWRs. USAEC. WASH-1327, 1974.
3. Call D., Lacey P. «Trans. Amer. Nucl. Soc.», 1975, v. 19, p. 347.
4. Siltanen P. FORM, A Multigroup Code for Calculating the Fundamental Mode Flux and Current Spectra of Fast Neutrons. Techn. Res. Centre of Finland. Nucl. Engng Laboratory. Rep. N 6, 1973.
5. Saastamoinen J., Wasastjerna F. THERMOS-OTA, A Revised Version of the THERMOS Program for Thermal Lattice Calculations with the Auxiliary Programs THEPSL and THECOM. Techn. Res. Centre of Finland. Nucl. Engng Laboratory. Rep. N 10, 1974.
6. Kaloinen E. A Two-Dimensional Multigroup Diffusion Code for Trigonal or Hexagonal Mesh. Techn. Res. Centre of Finland. Nucl. Engng Laboratory. Rep. N 1, 1973.

УДК 621.181.021:621.039.517.5

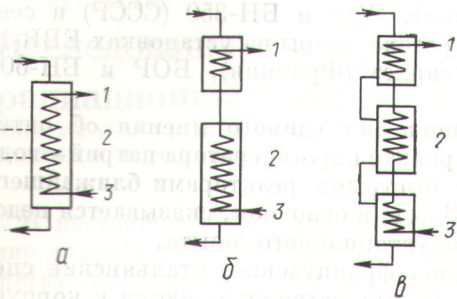
## О схемах парогенераторов натрий — вода

Кириллов П. Л., Поплавский В. М.

В настоящее время возможные конструкции парогенераторов натрий — вода уже определены. Однако терминология еще не установилась, и это вызывает определенные трудности при обсуждении конструкций и при технических переводах. Это отчетливо обнаружилось на семинаре по парогенераторам (In: Proc. Development of Sodium-Cooled Fast Breeder Reactor Steam Generators. Los Angeles, 1974, v. 1).

Конструкции парогенераторов для АЭС с быстрыми реакторами, охлаждаемыми жидким натрием, развиваются в двух направлениях.

Первое характеризуется развитием корпусных конструкций, главными признаками которых являются: наличие корпусов таких размеров, которые обеспечивают тепловую мощность одной реакторной петли; отсутствие параллельного включения корпусов; невозможность отключения какого-либо корпуса без нарушения технологического режима данной петли. Каждый корпус может выполнять одну или несколько функций экономайзера, испарителя, пароперегревателя, промежуточного перегревателя. Он может объединять два или



**Рис. 1.** Корпусный парогенератор:

Shell-type steam generator:	Corps type generateur de vapeur:	Korpus Typ Dampferzeuger:
a — интегральный (однокорпусный)	integral type (one-shell)	integrierter (ein Korpus)
б — двухкорпусный	two-shell	zwei Korpusse
в — трехкорпусный	three-shell	drei Korpusse

даже все эти элементы. Если корпус объединяет все элементы, то это будет интегральная (однокорпусная) конструкция (рис. 1, а). При делении корпуса на несколько получим двух- или трехкорпусную конструкцию (рис. 1, б, в) \*.

**Второе** направление — секционные (модульные) конструкции, основными признаками которых являются: наличие параллельно включенных секций; объединение всех функциональных элементов парогенератора в одном модуле или в нескольких; отключение одной или даже нескольких секций не приводит к выключению из работы всего парогенератора. Секция может быть выполнена в интегральном (одномодульном) исполнении (рис. 2, а), двухмодульном (рис. 2, б), трехмодульном (рис. 2, в) и т. п.

**Секция** — это часть парогенератора, представляющая собой один или группу модулей, которые могут быть отключены одновременно.

**Модуль** — отдельный, технологически заверченный в заводских условиях элемент конструкции, обладающий признаками теплообменного аппарата (наличие корпуса, теплообменных элементов, входных и выходных камер теплоносителя и т. д.). Модуль может иметь одно определенное назначение (экономайзер, испаритель) или объединять несколько элементов, т. е. он может быть комбинированным модулем.

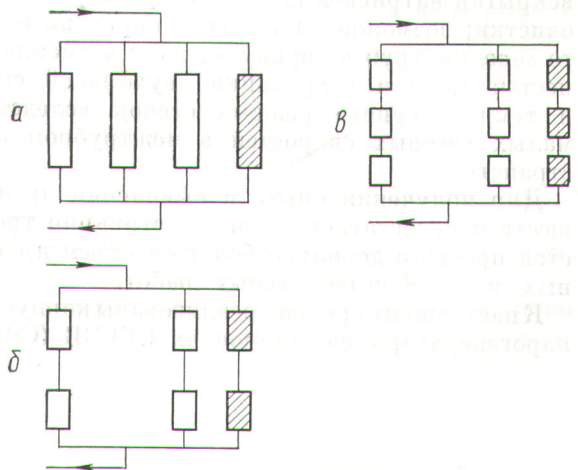
Модули можно классифицировать по размерам: микромодули (1 МВт), модули малой мощности (1—10), модули средней мощности

(10—100), модули большой мощности (свыше 100 МВт).

Корпусные парогенераторы обладают следующими преимуществами: компактностью, меньшей удельной стоимостью, меньшими затратами металла, меньшими затратами на монтаж и минимальным количеством приборов.

К недостаткам корпусных парогенераторов относятся: усложнение технологии изготовления вследствие больших размеров; увеличение срока изготовления и сложность консервации, трудность поиска дефектных элементов в условиях эксплуатации; выключение всей петли для ремонта парогенератора при выходе из строя одной трубки; невозможность определения последствия развития течи и, следовательно, невозможность продолжения эксплуатации после устранения течи. Есть основания полагать, что материал соседних трубок в результате реакции натрия с водой может получить значительные структурные изменения при больших течах и сквозные повреждения — при малых.

Преимущества секционных (модульных) парогенераторов: простота технологии изготовления; возможность проверки теплогидравлических характеристик в стендовых условиях непосредственно на модулях натуральных размеров; высокая надежность в связи с возможностью лока-



**Рис. 2.** Секционный (модульный) парогенератор:

Section-type (module type) steam generator:	Section type generateur de vapeur:	Sektion Typ Dampferzeuger:
a — интегральная секция (одномодульная)	integral (one module)	integrierte Sektion (ein Modul)
б — двухмодульная секция	two-module	zwei Modul-Sektion
в — трехмодульная секция	three-module	drei Modul-Sektion

\* В подписях к рис. 1, 2 даны предлагаемые термины на четырех языках.

лизации аварии в пределах одного модуля при разрушении трубки; возможность работы при выходе из строя других модулей; умеренная стоимость модуля.

Недостатки секционных (модульных) парогенераторов: меньшая компактность по сравнению с корпусными; большие габариты и суммарная металлоемкость, большая суммарная стоимость; большая сложность (коллекторы, арматура, приборы); возможность появления разверок расхода в работе при большом числе параллельных каналов; более высокие давления при реакции натрия с водой.

В настоящее время появились предложения о разработке вариантов конструкции парогенератора с течением натрия в трубах и, парожидкостной смеси в межтрубном пространстве. Такие конструкции получили название «обратных» парогенераторов. Основное их преимущество — ограничение размеров аварии в случае появления течи и контакта воды с натрием. Область реакции выносится из трубчатки во входную и выходную камеры; соседние трубки оказываются неповрежденными. Другим преимуществом является давление снаружи трубок, что снижает напряжение в стенках на поверхность со стороны воды.

Недостатки такой конструкции следующие: трудность поиска течи и ремонта вследствие вскрытия натриевой полости и предварительной очистки; возможность целевой коррозии в месте заделки труб в трубную доску; возможность нестабильности гидравлики двухфазной смеси и температурного режима стенок вследствие малых весовых скоростей в межтрубном пространстве.

Для получения опыта и выявления преимуществ и недостатков такой конструкции требуется провести довольно большой объем проектных и экспериментальных работ.

В настоящее время реализованы корпусные парогенераторы на установках EFR (США),

PFR (Англия), BOR и БН-350 (СССР) и секционные парогенераторы на установках EBR-II (США), «Феникс» (Франция), BOR и БН-600 (СССР).

Однако пока нет единого мнения об оптимальном варианте парогенератора натрия—вода для АЭС с быстрыми реакторами ближайшего будущего. Здесь, в основном, сказывается недостаток эксплуатационного опыта.

Английские, французские, итальянские специалисты в большинстве склоняются к корпусным типам парогенераторов для реакторов большой мощности. Ученые СССР и США считают, что достаточными преимуществами обладают секционные (модульные) парогенераторы.

Опыт работ, накопленный в Советском Союзе в период создания парогенераторов для установок BOR-60 и БН-350 по экспериментальному конструированию, отработке технологии изготовления, монтажу, консервации, а также опыту наладочных работ и эксплуатации показал, что наиболее оптимальным в ближайшем будущем будет секционный парогенератор по обеспечению максимальной безопасности и достаточной работоспособности (сохранение парогенератора при течах). При этом выбор количества секций и модулей в каждой секции должен проводиться с учетом не только безопасности и работоспособности, но и экономичности.

Для реализации преимуществ секционной конструкции необходимо создать эффективную систему его аварийной защиты, способную значительно повысить работоспособность парогенератора и снизить опасность течей.

В настоящее время возникла необходимость в разработке объективных критериев для оценки различных конструкций парогенераторов. Безусловно, что такими критериями должны быть стоимость парогенератора и издержки за время его эксплуатации.

Поступила в Редакцию 4/V 1975 г.