

Проблема воспроизводства важна для энергетич. реакторов, в первую очередь для атомных электростанций (АЭС). Наиб. важен уран-плутониевый цикл, в к-ром сырьём служит ^{238}U , а выгорает и вновь образуется ^{239}Pu . Если в реакторе используется уран, обогащённый изотопом ^{235}U , то вместо выгорающего ^{235}U образуется ^{239}Pu . Такой т. н. конверсионный цикл может служить лишь нач. стадией перехода к основному уран-плутониевому циклу в Р.-р.

Коэф. воспроизводства K наз. отношение кол-ва вновь образовавшегося горючего к кол-ву выгоревшего за то же время. Расширенное воспроизводство имеет место, когда $K > 1$. В уран-плутониевом цикле кроме ^{239}Pu образуются (за счёт последоват. поглощения нейтронов) ядра ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu . Эти ядра также претерпевают деление, размножат нейтроны и могут вносить вклад в мощность Р.-р. После неск. лет работы в Р.-р. устанавливается постоянный (асимптотич.) состав основных делящихся ядер (не зависящий от исходного), в к-ром содержится 65—75% ^{239}Pu , остальное приходится на высшие изотопы Pu. Постоянство состава делает возможным и целесообразным определение коэф. воспроизводства K для такого ядерного горючего.

Величина K определяется относит. кол-вом нейтронов, поглощающихся в ядерном сырье. Это кол-во зависит от ядерных свойств всех материалов, находящихся в реакторе. Оно обусловлено необходимостью обеспечить протекание ядерной цепной реакции деления.

Формула баланса имеет вид

$$K = \bar{\nu} - \alpha - 1 + (\nu_a - 1)\epsilon - \delta. \quad (1)$$

Здесь $\bar{\nu}$ — ср. кол-во вторичных нейтронов, приходящихся на один акт деления ядра Pu (усреднённое по всем 4 его изотопам со статистич. весом, пропорциональным вероятности их деления); α — отношение сечения радиац. захвата нейтрона к сечению деления Pu (с тем же усреднением); ν_a — ср. кол-во вторичных нейтронов на 1 акт деления ядра ^{238}U ; ϵ — доля актов деления ядер ^{238}U на один акт деления Pu; δ — потери нейтронов в результате захвата в неделящихся материалах и утечки наружу на один акт деления Pu. Существуют и др. способы определения K , относящиеся только к ^{239}Pu и по-разному учитывающие взаимодействие нейтронов с материалами.

Величина K зависит от энергии нейтронов. С увеличением энергии от тепловой области к быстрой уменьшаются α и δ и растёт ϵ . В результате, если для реакторов на тепловых нейтронах для ^{239}Pu $K < 1$, то для реакторов на быстрых нейтронах $K > 1$ ($K = 1, 2-1,6$). Т. о., в быстрых реакторах имеет место расширенное воспроизводство ^{239}Pu . Термин «быстрый реактор» по существу — синоним Р.-р.

Расширенное воспроизводство ^{233}U с K , немного превышающим 1, возможно и в тепловых реакторах. Для получения необходимого кол-ва ^{233}U реактор должен начать работу на ^{235}U или ^{239}Pu .

Устройство и особенности. В тепловыделяющих элементах (ТВЭЛх) Р.-р. в качестве топлива обычно используется керамич. смесь $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$, иногда др. прочные хим. соединения или смесь Pu и U в виде металлов. Оболочкой ТВЭЛа служит тонкостенная трубка диам. 6—8 мм. В цилиндрич. активной зоне (объём неск. м³) размещаются (2—5) $\cdot 10^4$ ТВЭЛов. Группы ТВЭЛов (100—200) собираются в т. н. тепловыделяющие сборки (ТВС). Быстрые нейтроны обладают большой проникающей способностью, и поэтому заметное их кол-во покидает активную зону. Для утилизации этих нейтронов в отражателе реактора помещается ^{238}U (UO_2), в к-ром, как и в активной зоне, происходит накопление Pu. Такой отражатель наз. экраном или blanketом.

В Р.-р. отсутствуют вещества-замедлители нейтронов (упругое рассеяние). Однако нек-рое замедление нейтронов всё же происходит за счёт гл. обр. неупругого рассеяния. Поэтому энергетич. спектр ней-

тронов несколько мягче спектра нейтронного деления (неск. сотен кэВ вместо 2 МэВ).

Особенности Р.-р. определяются взаимодействием быстрых нейтронов с материалами активной зоны. Сечения деления для быстрых нейтронов существенно ниже (на 2 порядка), чем для тепловых. В результате критическая масса значительно больше, чем для тепловых реакторов (в тех же размерах). Чтобы снизить уд. затраты на ядерное горючее, «замороженное» в критич. массе, необходимы высокие плотности тепловыделения (~1000 кВт/л). Для столь интенсивного отвода тепла из реактора в качестве теплоносителя применяется жидкий Na (вода исключается, т. к. является замедлителем нейтронов). Недостаток Na — высокая хим. активность при взаимодействии с водой или кислородом воздуха, что может негативно проявляться при аварийных ситуациях.

Отношение сечения деления Pu к сечению радиац. захвата ^{238}U для быстрых нейтронов немного меньше, чем для тепловых. Поэтому для обеспечения критич. режима необходимо увеличивать концентрацию Pu в смеси Pu — U до 16—30% (в тепловых ~ 2—3%). Время жизни нейтронов в Р.-р. (время между двумя последоват. циклами деления) порядка 10^{-7} — 10^{-8} с (в тепловых реакторах на неск. порядков больше).

Особенностью Р.-р. является трёхконтурная схема. На первичного контура передаёт тепло из реакто-

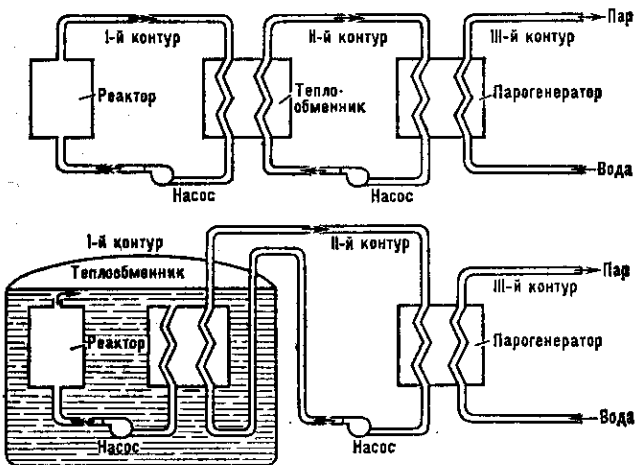


Рис. 1. Петлевая (а) и интегральная (б) схемы размещения оборудования.

ра в теплообменнике натрия второго контура. Последний же в парогенераторе нагревает воду третьего контура, к-рая превращается в пар и поступает на турбину. При этом исключается опасность попадания воды в активную зону, что может вызвать нежелат. изменение реактивности. Исключается также возможность взаимодействия воды с радиоактивным Na (первичного контура) с последующим выходом радиоактивности наружу.

Существуют 2 варианта компоновки АЭС: петлевой и интегральный (рис. 1). В петлевом варианте все натриевые контуры размещаются в изолир. боксах, заполненных воздухом или инертным газом. В интегральном варианте все элементы первичного контура (насосы, теплообменники, трубопроводы и сам реактор) помещаются в бак, заполненный Na, к-рый также участвует в циркуляции по первичному контуру.

Первый отечеств. пром. Р.-р. БН-350 (АЭС в г. Шевченко) двухцелевого назначения (энергетика и опреснение морской воды) тепловой мощностью 750 МВт выполнен в петлевом варианте; реактор БН-600 (Свердловская обл.) электрич. мощностью 600 МВт имеет интегральную компоновку. Пром. Р.-р. работают также во Франции и Великобритании. Сооружается отече-