

УДК 621.039.56

Коллекторная подача питательной воды и устойчивость энергораспределения в кипящих канальных реакторах

БУДНИКОВ В. И., КОСОЛАПОВ С. В., КРАМЕРОВ А. Я.

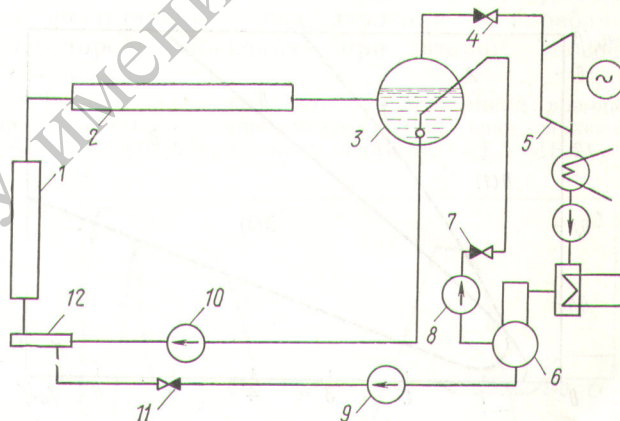
Для исключения разрушения активной зоны реакторов РБМК при гипотетическом разрыве напорного коллектора в работе [1] предложено подавать в нормальных эксплуатационных режимах часть питательной воды непосредственно в раздающие групповые коллекторы (РГК). При таком способе подачи питательной воды (ППВ) изменение ее расхода в РГК влияет не только на энтальпию воды на входе реактора, но также и на суммарный расход теплоносителя в реакторе. В связи с этим появляется дополнительная (по сравнению со способом подачи всей питательной воды в опускные трубы) обратная связь: расход питательной воды в РГК — расход теплоносителя в реакторе — мощность — уровень воды в барабане-сепараторе — расход питательной воды в РГК. Принимая во внимание, что при достаточно больших положительных значениях парового коэффициента реактивности нейтронное поле в кипящих канальных реакторах может быть неустойчиво с малым периодом [2], необходимо заранее оценить, как повлияет коллекторная ППВ на расположение границы и период неустойчивости энергораспределения в таких реакторах.

Рассмотрим АЭС с РБМК, в которой в опускные трубы барабана-сепаратора подается только часть питательной воды, а остальная поступает в РГК (рис. 1). Для краткости этот способ ППВ будем в дальнейшем называть вторым в отличие от первого способа ППВ, при котором вся питательная вода подается в опускные трубы барабана-сепаратора.

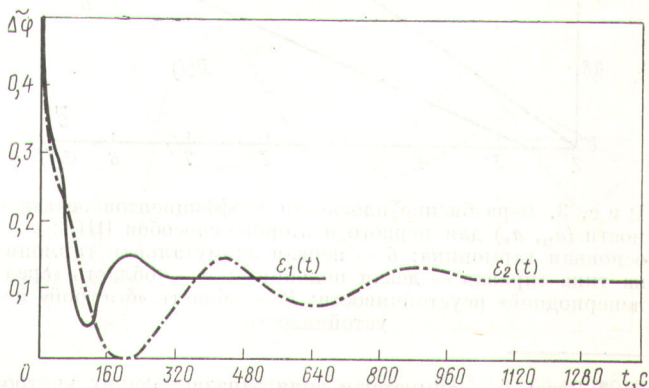
Расчеты проводили по методике [2]. Предполагали, что при втором способе ППВ расход питательной воды в опускные трубы барабана-сепаратора постоянен и равен 25% суммарного номинального*, а регулирование расхода питательной воды осуществляется изменением расхода воды, подаваемой в РГК питательными электронасосами (ПЭН). Переходные функции рассчитывали в предположении, что в окрестности состояния равновесия характеристика регулятора уровня (РУ) воды в барабане-сепараторе является линейной.

Исследование устойчивости номинального режима. Для среднего технологического канала РБМК с интенсификаторами теплообмена [3] на рис. 2 приведены переходные функции $\varepsilon_1(t)$ и $\varepsilon_2(t)$, рассчитанные по программе ОКА [4] соответственно для первого и второго способов ППВ. Различие

поведения функций $\varepsilon_1(t)$ и $\varepsilon_2(t)$ связано с тем, что в номинальном режиме при втором способе ППВ питательный клапан РУ более прикрыт, чем при первом способе. Кроме того, на участке $t \in (0, 30)$ на вид функции $\varepsilon_1(t)$ влияет транспортное запаздывание по энтальпии теплоносителя на опускной трубе барабана-сепаратора. В соответствии с методикой [2] по функциям $\varepsilon_1(t)$ и $\varepsilon_2(t)$ находили передаточные функции, которые затем подставляли в характеристическое уравнение. Анализ расположения корней последнего проводили с помощью метода D -разбиения плоскости коэффициентов реактивности топлива ($a_r = -a_{rt} \times \times (\bar{t}_r^* - \bar{t}_r^*)$) и паросодержания (a_n). Здесь $a_{rt} =$



Р и с. 1. Упрощенная структурная схема контура циркуляции теплоносителя в АЭС с РБМК при втором способе подачи питательной воды: 1 — ТК; 2 — пароводяная коммуникация; 3 — барабан-сепаратор; 4 — регулятор давления; 5 — турбогенератор; 6 — деаэратор; 7, 11 — регуляторы уровня воды в барабане-сепараторе; 8, 9 — питательные электронасосы; 10 — ГЦН; 12 — РГК



Р и с. 2. Характерный вид переходных функций $\varepsilon(t)$ для АЭС с РБМК при первом и втором способах ППВ

* Такой расход питательной воды в опускные трубы барабана-сепаратора требуется для обеспечения бескавитационной работы ГЦН.

температурный коэффициент реактивности топлива; $\bar{t}_r^*$, $\bar{t}_t^*$ — усредненная по активной зоне стационарная температура топлива и теплоносителя. На рис. 3, а приведена часть D -кривой, определяющей границу «быстрой» неустойчивости, обусловленной влиянием «быстрого» мощностного коэффициента реактивности. Расчет проводили при коэффициенте реактивности замедлителя $a_3 = 5\beta^*$ для основной гармоники в пренебрежении отравлением ксеноном и при «выключенном» регуляторе общей мощности. Пунктирная и сплошная линии на рис. 3, а рассчитаны соответственно для первого и второго способов ППВ. Особая прямая, определяющая границу «среднепериодной» неустойчивости, обусловленной положительным коэффициентом реактивности по замедлителю, расположена за пределами этого рисунка. Заметим, что особые прямые для первого и второго способов ППВ совпадают. Это связано с тем, что установившиеся значения функций $\varepsilon_1(t)$ и $\varepsilon_2(t)$ одинаковы. Послед-

нее позволяет также утверждать, что и характерное время «среднепериодной» неустойчивости при обоих способах будет одно и то же. Из рис. 3, а следует, что при втором способе ППВ граница быстрой неустойчивости несколько отодвигается в область более высоких значений парового коэффициента реактивности. Так, например, при $a_r = \beta$ разница в граничных значениях a_{II} при рассматриваемых способах ППВ составляет $\sim \beta$. Аналогичная картина наблюдается и на первой азимутальной гармонике типа «правая — левая половина», часть D -кривой для которой изображена на рис. 3, б. Здесь разница в граничных значениях a_{II} несколько больше и при $a_r = \beta$ составляет $\sim 1,75\beta$. Отметим, что на первой азимутальной гармонике отклонение средней мощности равно нулю и, следовательно, регулятор общей мощности не работает.

На основании вышесказанного можно сделать следующий вывод. При использовании коллекторной подачи питательной воды в АЭС с РБМК граница «среднепериодной» неустойчивости не изменяется, и лишь несколько возрастает запас по отношению к «быстрой» пространственной неустойчивости.

Расчет переходных процессов. Выше отмечалось, что при втором способе ППВ изменение расхода питательной воды в РГК влияет не только на энтальпию воды на входе активной зоны, но и на расход теплоносителя в реакторе. В связи с этим для сравнения двух способов ППВ представляет интерес переходный процесс, вызванный изменением давления в напорном коллекторе ПЭН. На рис. 4 и рис. 5 приведены результаты расчета такого переходного процесса соответственно для рассматриваемых способов ППВ при ступенчатом увеличении давления в напорном коллекторе ПЭН на 2% его номинального значения. Расчет проводили по программе ОКА с учетом системы регулирования общей мощности реактора. Суммарный «вес» четырех стержней автоматического регулирования (АР) принимали равным $0,312\beta$; коэффициенты реактивности $a_r = \beta$; $a_{II} = 3\beta$; $a_3 = 5\beta$. Постоянные времени нагрева графита и топлива выбрали равными соответственно 4200 и 12 с.

На рис. 4, а показано относительное отклонение нейтронного потока n от его стационарного значения и реактивность R , вносимая стержнями АР. На 23 с переходного процесса стержни АР достигают концевых выключателей и отклонение нейтронного потока выходит за пределы «мертвой зоны» регулятора общей мощности. Через 50 с это отклонение превышает 5%. Затем устанавливаются колебания мощности с периодом $\sim 1,5$ мин. Рис. 4, б иллюстрирует изменение относительного расхода питательной воды G'' и приращение среднего паросодержания в активной зоне $\Delta\varphi$. Видно, что увеличение давления в напорном коллекторе ПЭН приводит к практически мгновенному увеличению G''

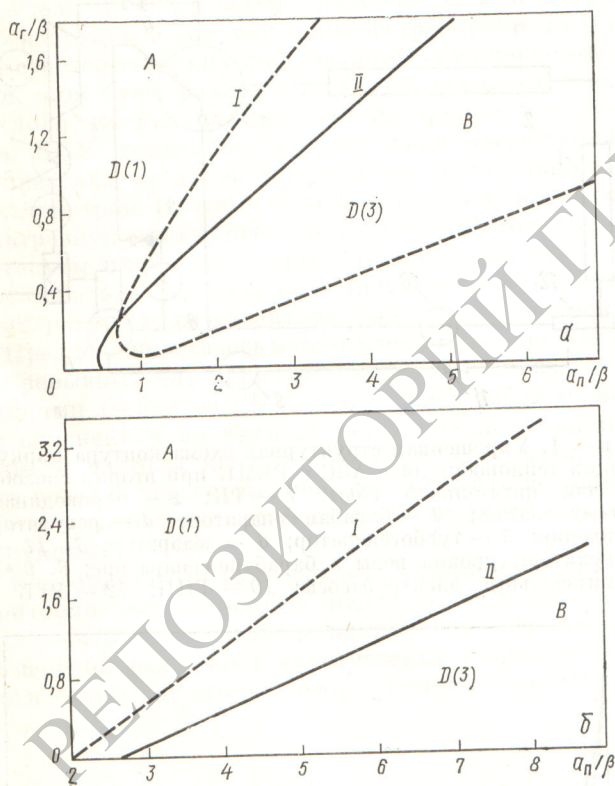
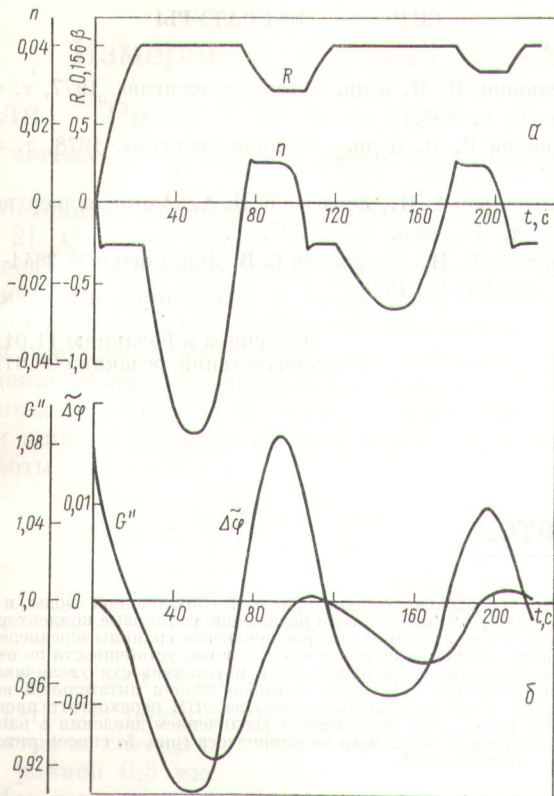


Рис. 3. D -разбиение плоскости коэффициентов реактивности (a_{II} , a_r) для первого и второго способов ППВ: а — основная гармоника; б — первая азимутальная гармоника типа «правая — левая половина»; А — область «среднепериодной» неустойчивости; В — область «быстрой» неустойчивости

* Здесь β — суммарная доля запаздывающих нейтронов; $a_3 = a_{3t}(\bar{t}_3^* - \bar{t}_t^*)$; a_{3t} — температурный коэффициент реактивности замедлителя; $\bar{t}_3^*$ — усредненная по активной зоне стационарная температура замедлителя.



Р и с. 4. Переходный процесс в АЭС с РБМК для первого способа ППВ при ступенчатом увеличении давления в напорном коллекторе ПЭН

приблизительно на 5%. Затем устанавливаются колебания расхода питательной воды с периодом $\sim 1,5$ мин. Небольшое уменьшение $\Delta\phi$ в течение первых 20 с переходного процесса частично обусловлено ростом давления в барабане-сепараторе при увеличении G'' . К 20 с на вход активной зоны приходит возмущение по энтальпии воды, вызванное увеличением G'' , и начинается резкий спад $\Delta\phi$. На рис. 5 показан переходный процесс при втором способе ППВ. Относительный расход питательной воды в РГК обозначен G_2'' . Как следует из рис. 5, а, колебания мощности при этом способе практически не выходят за пределы «мертвой зоны». Период этих колебаний составляет ~ 2 мин. Система регулирования мощности использует менее 7% полного «веса» стержней АР.

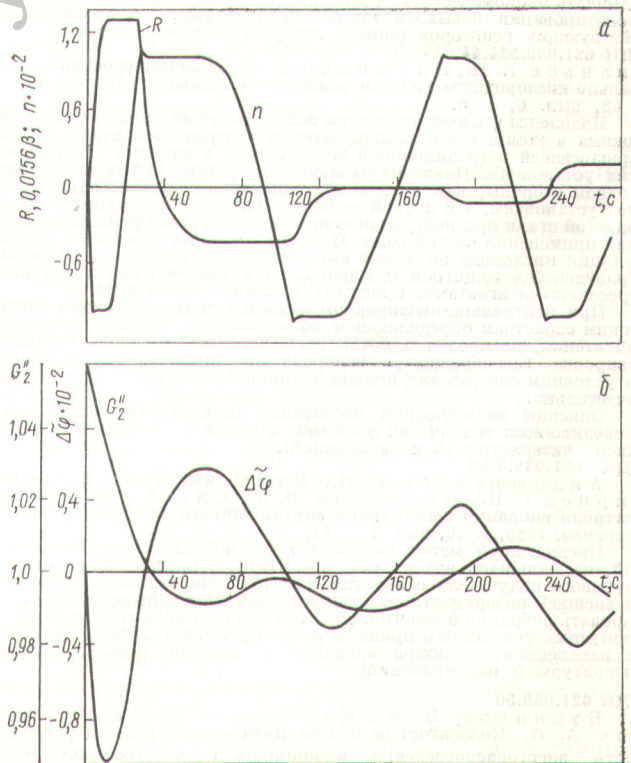
Сравнивая рис. 4 и 5, можно заметить, что отклонения переменных в переходном процессе при первом способе ППВ заметно превышают отклонения аналогичных переменных при втором способе. Исключение составляет лишь начальный участок переходного процесса (~ 30 с). Здесь разница в поведении $\Delta\phi$ обусловлена тем, что при первом способе ППВ транспортное запаздывание по энтальпии на входе реактора существенно больше, чем при втором. Кроме того, при последнем способе

изменение расхода питательной воды в РГК сразу же влияет на входную энтальпию.

Как на рис. 4, б, так и на рис. 5, б наблюдаются колебания расхода питательной воды. Вообще говоря, эти колебания могут быть вызваны работой систем регулирования общей мощности реактора и уровня воды в барабане-сепараторе. Однако главной причиной колебаний расхода питательной воды, как показывают проведенные дополнительные расчеты при «выключенном» регуляторе общей мощности, является неустойчивость основной гармонике нейтронного поля. Действительно, колебания мощности вызывают колебания питательного клапана РУ и, следовательно, приводят к колебаниям расхода питательной воды.

При коллекторной подаче питательной воды целесообразно повысить требования к быстродействию системы регулирования давления в барабане-сепараторе. Последнее связано с тем, что в некоторых аварийных режимах (например, при ложном сбросе аварийной защиты АЗ-5) происходит значительный спад давления в барабане-сепараторе*. Поскольку при втором способе

* Расчеты показывают, что при постоянной времени синхронизатора турбины, равной 50 с, спад давления в барабане-сепараторе может достигать $\sim 1,5$ МПа.



Р и с. 5. Переходный процесс в АЭС с РБМК для второго способа ППВ при ступенчатом увеличении давления в напорном коллекторе ПЭН, подающем 75% питательной воды

ППВ недогрев воды до насыщения в опускных трубах барабана-сепаратора меньше, чем при первом, то кавитационные запасы ГЦН могут несколько уменьшиться. Расчеты показывают, что этого уменьшения не наблюдается, если постоянная времени синхронизатора турбины составляет ~ 10 с. Следует также отметить, что на результаты сравнения динамических характеристик АЭС при рассмотренных способах ППВ заметное влияние могут оказать параметры настройки систем регулирования давления и уровня воды в барабанах-сепараторах.

Авторы благодарят Е. Ф. Сабаева за обсуждение результатов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов И. Я. и др. «Атомная энергия», 1977, т. 43, вып. 6, с. 458.
2. Будников В. И. и др. «Атомная энергия», 1978, т. 45, вып. 5, с. 331.
3. Александров А. П., Доллежал Н. А. «Атомная энергия», 1977, т. 43, вып. 5, с. 337.
4. Будников В. И., Косолапов С. В. Деп. статья № 2841-78 М., ВИНТИ, 1978.

Поступила в Редакцию 11.01.78
В окончательной редакции 08.01.80

Рефераты статей

УДК 621.039.553

Цыканов В. А., Залетных Б. А., Кирилов Е. В., Куприенко В. А. Критерии экономической эффективности использования исследовательских реакторов, предназначенных для материаловедческих испытаний. — «Атомная энергия», 1980, т. 49, вып. 1, с. 3.

Рассматриваются критерии экономической эффективности (приведенные затраты на единицу работы) исследовательских реакторов — универсальных и многопетлевых, используемых для испытания материалов и изделий. Критерии, сформулированные с учетом специфики использования каждого типа реакторов, позволяют оценивать экономическую эффективность технических решений при проектировании новых, а также эксплуатации и реконструкции действующих реакторов (список литературы 8 наименований).

УДК 621.039.534.44

Ананьев Е. П., Кружилин Г. Н. Физические основы нейтрально-кислородного водного режима. — «Атомная энергия», 1980, т. 48, вып. 6, с. 6.

Изложены физические основы нейтрально-кислородного водного режима в комплексе с использованием углеродистой стали вместо нержавеющей в традиционной энергетике и в ядерных энергетических установках. Показана эволюция представлений о кислороде, с одной стороны, как активном коррозионном агенте, наносящем вред установкам, а с другой — как пассиваторе поверхности углеродистой стали при нейтрально-кислородном водном режиме в условиях применения чистой воды. Показано, что при «плохой» воде эта функция кислорода не может выполняться вследствие разрушения образующейся защитной окисной пленки хлор-ионами и другими агрессивными агентами, присутствующими в такой воде.

При нейтрально-кислородном водном режиме, по своим физическим свойствам определяющим эффективность пассивации стальной стенки, дозировка в поток воды перекиси водорода уступает дозировке газообразного кислорода, и применение кислорода по условиям соблюдения правил техники безопасности более предпочтительно.

Описаны исследования пассивации поверхности кислородом, проводившиеся советскими учеными, а также за рубежом (рис. 2, список литературы 19 наименований).

УДК 621.039.5.58

Андрюшенков И. Н., Булавин В. В., Владимирцев С. И., Карманов Ф. В., Смоляр А. Г. Метод контроля вибраций конструкции внутри корпуса ВВЭР. — «Атомная энергия», 1980, т. 49, вып. 1, с. 11.

Предлагается метод контроля вибраций элементов конструкций, находящихся внутри корпуса ВВЭР, с применением ультразвукового излучателя и акустических приемников, расположенных на внешней поверхности корпуса реактора. Метод позволит контролировать вибрации элементов конструкции активной зоны и внутрикорпусных устройств в процессе работы реактора, а также следить за изменением характера вибраций во времени (рис. 3, список литературы 5 наименований).

УДК 621.039.56

Будников В. И., Косолапов С. В., Крамеров А. Я. Коллекторная подача питательной воды и устойчивость энергораспределения в кипящих канальных реакторах. — «Атомная энергия», 1980, т. 49, вып. 1, с. 15.

Для АЭС с РБМК рассчитаны границы радиально-азимутальной неустойчивости нейтронного поля в реакторе при подаче в опу-

скные трубы барабана-сепаратора всей питательной воды и ее части — 25% (75% поступают в раздающие групповые коллекторы). Показано, что во втором случае расположение границы «среднепериодной» неустойчивости не изменяется, а запас устойчивости по отношению к «быстрой» пространственной неустойчивости увеличивается. Для сравнения указанных способов подачи питательной воды приводятся также результаты расчета на ЭВМ переходного процесса в АЭС, вызванного ступенчатым увеличением давления в напорном коллекторе питательного электронасоса (рис. 5, список литературы 4 наименования).

УДК 539.173.4.162.3

Бергман А. А., Колосовский А. Г., Кузнецов С. П., Медведев А. Н., Самсонов А. Е., Толстиков В. А. Измерения сечений деления и отношения сечений деления для ^{239}Pu и ^{235}U в области энергии нейтронов от 100 эВ до 50 кэВ. — «Атомная энергия», 1980, т. 49, вып. 1, с. 19.

Проведены измерения сечений деления и отношения сечений деления для ^{239}Pu и ^{235}U на нейтронном спектрометре по времени замедления в свинце в области энергии нейтронов от 100 эВ до 50 кэВ в режиме одновременной регистрации событий деления ^{239}Pu и ^{235}U , что значительно повысило точность измерения отношения сечений деления. Нормировка сечений деления выполнена с помощью термализованного спектра нейтронов (табл. 4, список литературы 21 наименование).

УДК 621.039.531

Биджеро Дж., Борруто А., Марафини Ф. Хрупкое разрушение стали при электролитическом насыщении водородом. — «Атомная энергия», 1980, т. 49, вып. 1, с. 22.

Приведены результаты исследований воздействия водорода на сталь. Изучено влияние плотности тока на разрушение находящейся в электролите экспериментальной стали 38 NiCrMo4 и установлена корреляция с анализом микроструктуры и включений, выполненным при помощи сканирующего электронного микроскопа. Обнаружены «линии отдыха», подобные линиям на усталостных изломах, но имеющие другое происхождение. (рис. 7, табл. 2, список литературы 4 наименования).

УДК 536.422.15

Хромов Ю. Ф., Лютников Р. А. Некоторые термодинамические характеристики нитрида урана состава UN_y . — «Атомная энергия», 1980, т. 49, вып. 1, с. 25.

Методика одновременного измерения парциальных давлений компонентов применена при исследовании UN_y . Термодинамический анализ и оценка парциальных термодинамических свойств в системе $\text{U} - \text{N}$ для диапазона температуры 1750—2250 К проведены с использованием собственных измерений и опубликованных данных. Рассчитаны значения приведенной теплоты испарения и образования нитрида урана предельного состава $\text{UN}_{1,0}$ (рис. 2, табл. 2, список литературы 16 наименований).

Продолжение см. на с. 49