

Некоторые вопросы безопасности работы АЭС с газоохлаждаемыми быстрыми реакторами на диссоциирующем теплоносителе

Г. А. ШАРОВАРОВ

УДК 621.039.58

Один из важнейших вопросов ядерной энергетики — обеспечение безопасности работы АЭС с газоохлаждаемыми быстрыми реакторами, для которых характерны высокая теплонапряженность, малая аккумулирующая способность теплоносителя и соответственно малые времена развития аварийных процессов. Аварийные процессы могут быть разделены на два основных этапа: увеличение температуры топлива и оболочки твэла до температуры расплавления и расплавление активной зоны с перемещением топлива и возможным образованием вторичной критической массы, приводящим к взрыву.

В настоящее время во многих работах по исследованию аварийных процессов в различных типах АЭС с быстрыми реакторами рассматриваются требования обеспечения абсолютной безопасности [1—5]. К сожалению, до сих пор нет четко сформулированных общих требований и соответствующих нормалей по исследованию нестационарных аварийных процессов при проектировании АЭС. Это можно объяснить существенными различиями рассматриваемых АЭС по термодинамическим циклам, технологическим схемам, применяемым теплоносителям и другим особенностям.

Главная проблема обеспечения безопасности — не допустить расплавления активной зоны с возможным перемещением топлива, образованием вторичной критической массы и взрывом. Такая авария, как известно, определяется как предельная.

Для решения проблемы следует прежде всего предусмотреть надежную циркуляцию теплоносителя при аварийных режимах АЭС и расхолаживании реактора. Кроме того, конструкция реактора должна обеспечивать необходимые температурные эффекты и высокую надежность системы аварийной защиты.

Наиболее опасные аварийные ситуации связаны с разуплотнением первого контура в различных местах технологической схемы, обесточиванием главных циркуляционных насосов, компрессоров или всей АЭС, а также со случайным изменением реактивности. Во всех аварийных ситуациях необходима непрерывная циркуляция теплоносителя через реактор. Время

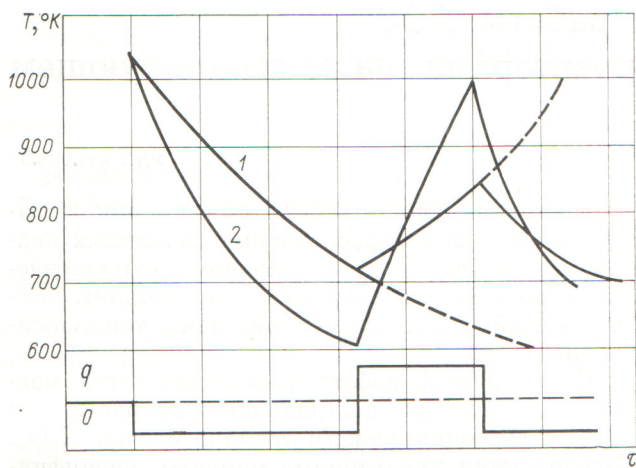
сохранения непрерывности циркуляции и характер изменения расхода при различных авариях определяются в основном технологической схемой, термодинамическим циклом, конструкцией реактора и свойствами теплоносителя.

В настоящей работе рассматриваются возможные решения поставленных вопросов для АЭС с диссоциирующим теплоносителем N_2O_4 . Исследуются характерные моменты, специфичные лишь для диссоциирующего теплоносителя, так как другие трудности обеспечения безопасности остаются общими для всех газоохлаждаемых реакторов. Главная особенность АЭС с диссоциирующим теплоносителем состоит в одноконтурной схеме преобразования и использования газожидкостного термодинамического цикла в газоохлаждаемом реакторе [5—10].

Основные характеристики нестационарных процессов ЯЭУ с диссоциирующим теплоносителем определяются нестационарными процессами в теплоносителе, который принципиально отличается от обычных газовых теплоносителей. Изменение теплофизических свойств диссоциирующего теплоносителя не позволяет рассматривать процессы в нем как безынерционные. При соизмеримости времени химических реакций и технологических процессов свойства при данных давлении и температуре зависят еще от характеристик нестационарного процесса в теплоносителе.

Например, на рис. 1 показано, что температура газа в реальном нестационарном процессе при изменении теплового потока меняется сильнее, чем при безынерционных химических реакциях.

На рис. 2 представлена фазовая диаграмма для относительной плотности кислорода в диссоциирующей смеси. Линия $C = O$ соответствует процессу с безынерционными химическими реакциями. Стрелками показана направленность возможного процесса при охлаждении в зависимости от исходного состояния. Количество кислорода определяется не только температурой и давлением, но и начальными условиями и характером нестационарного процесса. Таким образом, диссоциирующий теплоноси-



Р и с. 1. Зависимость температуры теплоносителя от времени при ступенчатом изменении теплового потока q : 1 — процесс по равновесным свойствам; 2 — процесс по неравновесным свойствам.

тель представляет собой динамическую систему, характеризуемую кинетикой химических реакций.

Одна из наиболее опасных аварий на многоконтурных АЭС с газовым или жидкометаллическим теплоносителями — обесточивание главных циркуляционных насосов или компрессоров, так как в этом случае крайне трудно сохранить непрерывную циркуляцию. Непрерывность циркуляции может быть сохранена в течение некоторого времени за счет выравнивания давлений между сторонами низкого и высокого давлений при определенном количестве теплоносителя на стороне высокого давления. Использование газожидкостного термодинамического цикла с диссоциирующим теплоносителем определяется большим количеством тепло-

носителя в контуре по сравнению с расходом и существенным перепадом между максимальным и минимальным давлением в контуре [10].

Отношение количества теплоносителя к расходу на соответствующем участке контура определяется коэффициентом

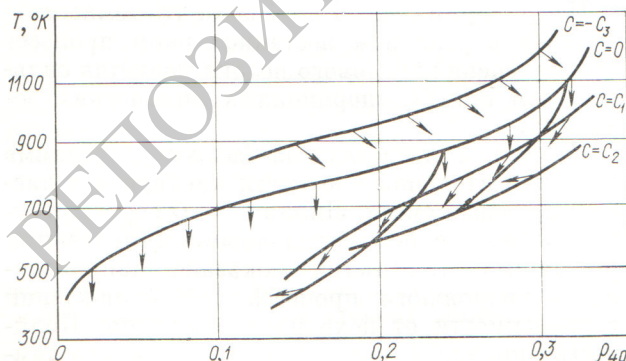
$$K_m = \frac{M}{G} \int_0^l \frac{dl}{w},$$

обозначающим время, в течение которого данный участок контура мог бы обеспечивать номинальный расход теплоносителя. Разница между максимальным и минимальным давлением приводит к естественному течению теплоносителя между сторонами высокого и низкого давления. Сравнительно малые скорости течения диссоциирующего теплоносителя в жидкой фазе обуславливают большие коэффициенты K_m . На отдельных участках, по данным ИЯЭ АН БССР, это время теплоносителя после остановки насоса в зависимости от конструкции и параметров цикла может колебаться от 20 до 60 сек.

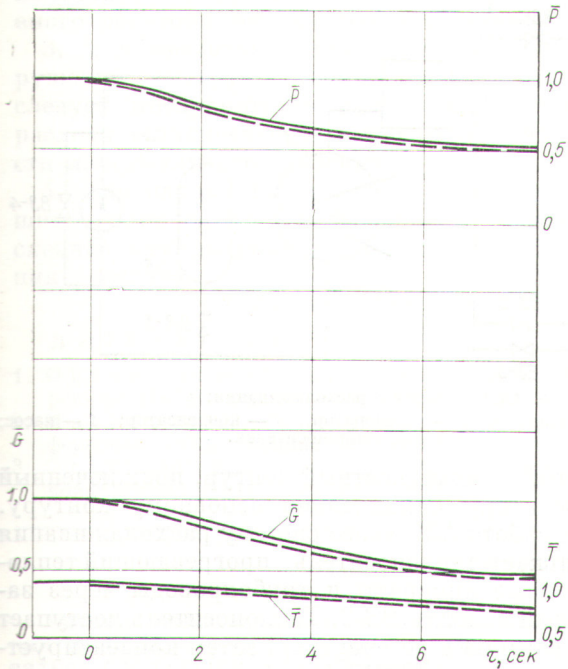
Для газоохлаждаемых контуров с другими теплоносителями рассматриваемый коэффициент существенно ниже. При двухконтурной системе преобразования разница между максимальным и минимальным давлением в первом контуре определяется только гидравлическими сопротивлениями и составляет малую величину, которая не может обеспечить необходимой циркуляции теплоносителя. В одноконтурной системе преобразования эта разница определяется степенью повышения давления в термодинамическом цикле. При использовании в качестве теплоносителя гелия эта величина колеблется от 2 до 7 [6]. В газожидкостном цикле с диссоциирующим теплоносителем степень повышения давления около 70 при разнице давлений до 160 атм.

При исследовании аварийных режимов были сделаны следующие основные допущения: расширение газа в контуре политропическое, топливо и оболочка твэла характеризуются средними по радиусу температурами, процессы в объемах происходят в соответствии с равновесными свойствами, характеристики турбин подчиняются уравнениям Флюгеля, кинетика реактора характеризуется сосредоточенной моделью с шестью группами запаздывающих нейтронов.

На рис. 3 показано, как изменяются расход, давление и температура диссоциирующего теплоносителя на входе в реактор при обесточи-



Р и с. 2. Фазовая диаграмма теплоносителя по кислороду ($P = \text{const}$, $q_v = -23\ 000 \text{ ккал/м}^3 \cdot \text{сек}$). Линии построены при постоянном значении $C = \frac{d\rho_{40}}{dT}$, причем $C_2 > C_1 > 0 > -C_3$.

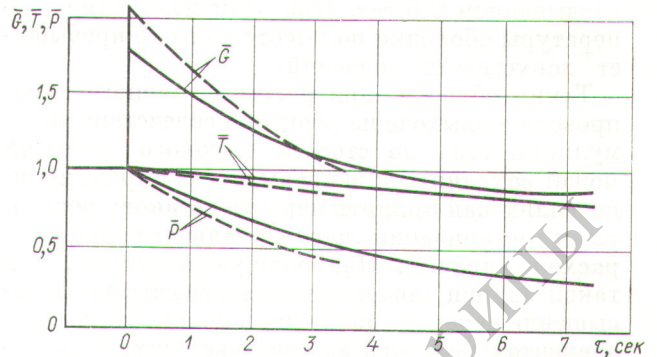


Р и с. 3. Изменение расхода, давления и температуры теплоносителя на входе в реактор при обесточивании: — главных циркуляционных насосов; - - - АЭС.

вании главных циркуляционных насосов (выбег насосов отсутствует и пар образуется только за счет тепла теплоносителя). При обесточивании всей станции пар проходит мимо турбин в конденсатор.

Вследствие аккумуляции газа по стороне высокого давления довольно длительное время сохраняется непрерывная циркуляция, позволяющая принять меры по восстановлению питания или останову реактора и организации процесса расхолаживания.

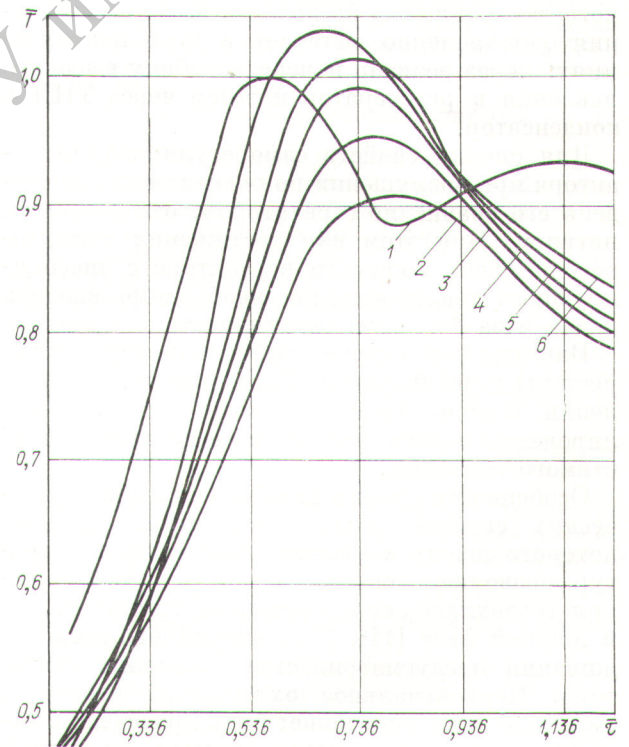
Рассмотрим аварию с разрывом главного паропровода с эффективным сечением, равным площади одной нитки на участке реактор — турбины высокого давления. На рис. 4 показано, как изменяются расход, температура и давление теплоносителя на входе в реактор для двух случаев такой аварии. Вначале резко увеличивается расход теплоносителя, затем следует его уменьшение со временем. Системы регулирования реактора поддерживают постоянную мощность, аварийная защита еще не сработала. На рис. 5 показано изменение температуры оболочки по длине зоны. Максимальное уменьшение температуры составляет около 10%.



Р и с. 4. Изменение расхода, давления и температуры теплоносителя на входе в реактор при разрыве трубопровода на выходе из него:

— — — разрыв главного паропровода с $F_{эфф} = \frac{1}{6} F_0$;
- - - разрыв одной (из шести) нитки паропровода.

Исследование изменения мощности за счет температурных эффектов при отказе системы автоматического регулирования мощности показало, что после достижения значения $N = 1,15 N_0$ включается аварийная защита с за-



Р и с. 5. Изменение температуры оболочки твэла при разрыве трубопровода на выходе из реактора: 1 — $\tau = 0$ сек; 2 — 0,5 сек; 3 — 1,5 сек; 4 — 2 сек; 5 — 2,5 сек; 6 — 3 сек.

паздыванием 0,5 сек. При этом изменение температуры оболочки по высоте зоны не превышает допустимых значений.

Таким образом, при разрыве главного паропровода на выходе из реактора вследствие аккумуляции газа по стороне высокого давления может сохраняться непрерывность циркуляции, позволяющая принять меры по останову реактора и организации первоначального процесса расхолаживания. Наибольшую опасность при такой аварии может вызвать существенное повышение перепада давления в конструктивных элементах реактора за счет увеличения гидравлических сопротивлений при повышенном расходе теплоносителя.

Весьма серьезной аварией является разрыв главного паропровода на входе в реактор. В зависимости от величины сечения разрыва возможно уменьшение прямой циркуляции и обратная циркуляция. В газовом тракте могут быть места с нулевым расходом теплоносителя. При обратной циркуляции теплоноситель в момент разрыва останавливается, а затем течет в обратном направлении вследствие аккумуляции газа на участке реактор — турбины высокого давления. Газ из полости высокого давления одновременно вытекает в двух направлениях: через реактор и через турбину высокого давления в регенератор и затем через ТНД в конденсатор.

Для оценки свойств саморегулирования реактора при возмущении по реактивности проведено его сравнение с реактором, охлаждаемым натрием. При этом для достижения одинакового выброса мощности в реакторе с диссоциирующим теплоносителем необходимо вводить в два раза большую реактивность.

Влияние плотностного эффекта на переходные режимы незначительно. Даже при полном удалении теплоносителя и отказе системы регулирования выброс мощности не превысит допустимого значения.

Особенности физико-химических и теплофизических свойств N_2O_4 , температура кипения которого лежит в рабочем диапазоне температур, позволяют использовать для расхолаживания газоохлаждаемого реактора теплоноситель в жидкой фазе [11]. Для аварийного расхолаживания предусматривается специальная система. Первоначальное охлаждение реактора, как было показано, может быть проведено с помощью основного контура, а затем подключается система расхолаживания.

На рис. 6 представлена схема системы расхолаживания, которая представляет собой зам-

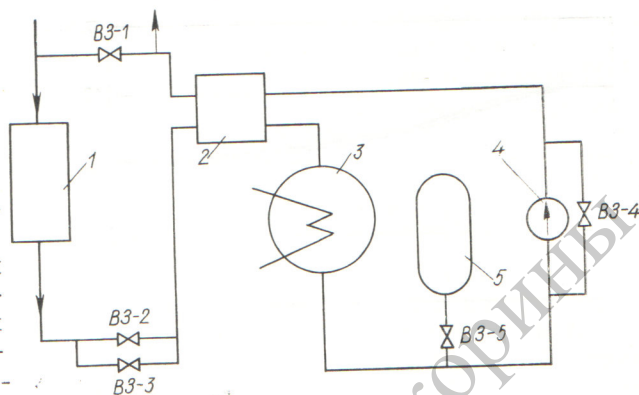


Рис. 6. Схема системы расхолаживания: 1 — реактор; 2 — регенератор; 3 — конденсатор; 4 — насос; 5 — емкость с жидким теплоносителем.

кнутый газожидкостный контур, подключенный к реактору параллельно основному контуру. При работе АЭС через систему расхолаживания протекает теплоноситель, прогревающий теплообменные аппараты и трубопроводы через запорный вентиль ВЗ-3. Теплоноситель поступает из реактора в регенератор, затем конденсируется, через вентиль ВЗ-4 в обвод насоса поступает в регенератор и сбрасывается в конденсатор главного контура.

Во время аварии тепло снимается главным контуром вследствие перетекания теплоносителя. Затем с помощью аварийной системы проводится расхолаживание, для чего открываются вентили ВЗ-1 и ВЗ-2, а главный контур отключается. Система расхолаживания работает по газожидкостному циклу. Снизив давление и температуру теплоносителя, переходят на жидкостную циркуляцию. Для этого открывается вентиль ВЗ-5, и жидкость из емкости подается в контур. Питание системы аварийного расхолаживания осуществляется от автономного источника электроэнергии.

Следует отметить, что система аварийного расхолаживания с применением жидкого продукта может быть использована в обычной эксплуатации.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Особенности технологической схемы и термодинамического цикла с диссоциирующим теплоносителем позволяют сохранить непрерывность циркуляции и обеспечить первоначальное охлаждение реактора при расхолаживании после срабатывания защиты в аварийных ситуациях.

2. Особенности физико-химических свойств диссоциирующих теплоносителей позволяют ис-

пользовать для расхолаживания газоохладяемого реактора теплоноситель в жидкой фазе.

3. Для предотвращения деформаций и разрушений конструктивных элементов реактора следует предусмотреть средства ограничения расхода теплоносителя, вытекающего из области максимального давления.

4. Для одноконтурных АЭС с диссоциирующим теплоносителем целесообразно применять специальную аварийную систему расхолаживания реактора.

Поступила в Редакцию 9/XI 1972 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Okrent D. et al. (США). III Женевская конференция (1964), доклад № 267.
2. Massarty Jr. et al. (США). III Женевская конференция (1964), доклад № 284.
3. Grattion K. et al. (Голландия). IV Женевская конференция (1971), доклад № 023.
4. Ковалевич О. М. В сб. «Состояние и перспективы работ по созданию АЭС с реакторами на быстрых нейтронах». Т. 2. Симпозиум СЭВ. Обнинск, 1967, стр. 344.
5. Багдасаров Ю. Е. и др. Технические проблемы реакторов на быстрых нейтронах. М., Атомиздат, 1969.
6. Красин А. К. Реакторы атомных электростанций. Минск, Изд-во «Наука и техника», 1971.
7. Нестеренко В. Б. Материалы Всесоюзной конференции «Диссоциирующие газы как теплоносители и рабочие тела энергетических установок». Минск, Изд-во «Наука и техника», 1970, стр. 11.
8. Термодинамические и переносные свойства химических реагирующих газовых систем. Под ред. А. К. Красина и В. Б. Нестеренко. Минск, Изд-во «Наука и техника», Ч. I, 1967, Ч. 2, 1971.
9. Нестеренко В. Б. Физико-технические основы применения диссоциирующих газов как теплоносителей и рабочих тел атомных электростанций. Минск, Изд-во «Наука и техника», 1971.
10. Нестеренко В. Б. и др. «Изв. АН БССР. Серия Физ.-энерг. наук», 3, 5 (1971).

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Авторы, направляющие свои рукописи в журнал «Атомная энергия», должны руководствоваться следующими требованиями:

1. Тексты и иллюстративные материалы представляются в четырех экземплярах в окончательно отработанном для печати виде.

Содержание статьи должно быть изложено с предельной ясностью и краткостью. Следует избегать повторения данных таблиц и графиков, а также представления численных результатов в виде таблиц и графиков одновременно.

2. Объем обзорных статей, как правило, не должен превышать 20—22 стр., оригинальных статей — 10—12 стр., аннотаций депонированных статей — 2 стр., писем в редакцию — 5 стр. машинописного текста (включая рисунки с подписями, таблицы и библиографию).

3. К статьям и письмам в редакцию должны быть приложены рефераты, составленные по правилам реферативных журналов, с четко сформулированной целью и результатами работы.

4. Статьи и рисунки должны быть подписаны всеми авторами. К рукописи необходимо приложить точный адрес, номер телефона, фамилию, полное имя и отчество авторов.

5. Названия всех работ, присылаемых в редакцию, должны быть переведены на английский язык, фамилии и инициалы авторов даны в английской транскрипции. Кроме того, рефераты к статьям должны быть переведены на английский язык (в строгом соответствии с русским рефератом).

6. Цитируемая литература приводится в конце работы общим списком с указанием:

а) для журнальных статей: фамилий и инициалов авторов, названия статьи, названия журнала, года, номера тома, выпуска и страницы;

б) для книг: фамилий и инициалов авторов,

полного названия книги, места издания, издательства и года издания; для иностранных книг указываются также данные русского перевода; в) для статей в сборниках: фамилий и инициалов авторов статьи, названия сборника, инициалов и фамилии составителя или редактора сборника, части, выпуска, места издания, издательства, года и страницы.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

7. Текст рукописей должен быть напечатан на машинке через два интервала по 28—29 строк на одной стороне листа с полями не уже 4 см; рукописные вставки не допускаются.

8. Оформление текста (написание формул, выделение греческих и латинских, строчных и прописных букв, сокращение слов и т. д.) производится в соответствии с общими правилами, принятыми для научно-технических журналов. Трудно различимые в рукописном обозначении буквы и знаки должны быть пояснены на полях.

9. Прилагаемые к тексту таблицы нумеруются по порядку, каждая таблица должна иметь заголовок.

10. Рисунки выполняются черной тушью на бумаге размером 15 × 20 см; фотографии должны иметь контрастные изображения, размер фотографии 12 × 18 см.

11. Подписи к рисункам прилагаются на отдельном листе. В тексте должны быть ссылки на рисунки.

12. Редакция посылает автору только одну корректуру, которую необходимо вернуть в предельно короткий срок.

Рукописи, не соответствующие этим требованиям, не рассматриваются. Отклоненные статьи не возвращаются.

