

УДК 621.039.534.63

Вопросы безопасности парогенераторов натрия — вода и их решение в СССР

ПОПЛАВСКИЙ В. М., БАГДАСАРОВ Ю. Е., КОЗЛОВ Ф. А., КОЧЕТКОВ Л. А., ТИТОВ В. Ф.

Парогенераторы натрия — вода в схеме АЭС с быстрым реактором занимают одно из важнейших мест. Об этом говорит опыт эксплуатации АЭС «Энрико Ферми» (США), БН-350 (СССР), «Феникс» (Франция), PFR (Великобритания). В процессе разработки различных концепций парогенераторов для быстрых реакторов утвердилось мнение, что, во-первых, при любой конструкции парогенератора следует рассматривать возможность аварийной ситуации в результате попадания воды в натрий и в связи с этим разрабатывать соответствующую систему аварийной защиты парогенератора; во-вторых, существующий уровень технологии позволяет надеяться на создание удовлетворяющей требованиям надежности конструкции парогенератора с одностенным разделением воды и натрия.

При проектировании промышленной АЭС БН-350 была принята концепция разделения натрия и воды в парогенераторе через одну стенку как экономически целесообразная. Подобный же принцип конструкции был впоследствии реализован и на установке БОР-60. Применение одностенной конструкции парогенератора натрия — вода обусловило изучение всего комплекса вопросов, связанных с безопасностью этих систем. Подобные работы, начатые в СССР в 1960 г., охватывали экспериментальное и расчетно-теоретическое изучение аварийных эффектов, возникающих при различных течах воды в натрий, создание расчетных методов оценки аварийного состояния натриевого контура, разработку схем и элементов системы аварийной защиты парогенератора. В настоящем обзоре изложены основные результаты изучения этого комплекса вопросов, а также принятый в СССР подход к обеспечению безопасности рассматриваемых парогенераторов.

Экспериментальное исследование аварийных процессов и расчетные методы ана-

лиза аварийных ситуаций. Первые экспериментальные работы в СССР по изучению эффектов, сопровождающих взаимодействие натрия с водой в условиях парогенератора, были направлены на доказательство принципиальной возможности создания конструкции, противостоящей контакту теплоносителей при возникновении больших течей.

Цикл исследований на различных моделях от простейших объемов до устройств, повторяющих основные характеристики (материал, геометрия и способ крепления, гидродинамика) трубных пучков парогенераторов БН-350 и БОР-60 [1-3], позволял выявить процессы, сопровождающие большие течи воды в натрий. Были определены характер изменения давления и температуры в зоне реакции, гидродинамические явления в натриевом контуре (характер деформации конструктивных элементов), выявлены способы ограничения аварийных параметров в допустимых пределах. Проведенные работы позволили к концу 60-х годов сформулировать принципы системы аварийной защиты парогенератора АЭС БН-350 [4, 5]. Были разработаны методы расчетной оценки основных параметров (давление, температура, расходы теплоносителей) натриевого контура в аварийном режиме.

В настоящее время используется несколько методов расчета этих параметров по соответствующим программам для ЭВМ. Так, для конструкций парогенераторов с развитым натриевым объемом применяется методика, основные допущения ее сводятся к следующему [5]:

- а) в расчет принимается только реакция с образованием гидроксида и водорода;
- б) реакция взаимодействия протекает мгновенно. Скорость накопления продуктов реакции определяется задаваемым расходом истечения воды в натрий, на величину расхода не влияет давление в натриевой полости;

в) распределение параметров (температура и давление) в объеме продуктов реакции равномерное;

г) в начальный момент в зоне продуктов реакции развиваются максимально возможные (при адиабатических условиях) теоретические значения давления и температуры;

д) теплообмен зоны взаимодействия, содержащей продукты реакции, с окружающей средой не учитывается.

Задаваемый расход истечения воды в натрий и закон его изменения во времени определяются постулированной максимальной аварией в парогенераторе, в качестве которой принимается мгновенный разрыв, равный полному сечению одной трубки. Этот выбор был сделан после специального анализа влияния типа постулированной аварии на развивающиеся давление и температуру в парогенераторе и втором контуре. Показано, что выбранная авария приводит к более опасным последствиям (с точки зрения динамических нагрузок), чем любая другая последовательность постепенного раскрытия даже нескольких трубок с максимальной скоростью, которая может быть предсказана из практики, экспериментов или расчетов.

По расчету максимальное давление в парогенераторах БН-350 и БН-600 при условии реализации аварии с мгновенным разрывом полным сечением одной теплопередающей трубки составляет $9 \cdot 10^5$ и $2 \cdot 10^6$ Па соответственно. Сжимаемость натрия учитывается с использованием акустического приближения. При приближенном анализе гидродинамических эффектов в элементах натриевого контура и определении переменного во времени поля давления можно использовать упрощенную программу расчета без учета сжимаемости натрия. В предварительных многовариантных расчетах для определения максимального давления в зоне реакции используется методика расчета на основе квазистационарного рассмотрения процессов.

Применительно к конструкциям парогенераторов с движением натрия в отдельных каналах (например, «обратный» вариант) разработана методика, в которой расход истечения воды в натрий определяется перепадом давления между пароводяной и натриевой полостями в зоне повреждения, а интенсивность взаимодействия реагентов — процессом массообмена между натрием и водой через образующуюся в натриевом канале водородную «пробку», а также взаимодействием попадающей в канал воды с пленкой натрия, оставшейся на стенках канала.

Первые работы по изучению особенностей аварийных режимов, связанных с малыми течами воды в натрий, были выполнены в 1962 г. [1]. Обнаружено, что при поступлении воды в натрий межтрубного пространства с расходом до нескольких сотых долей кг/с [через калиброванные отверстия диаметром $(0,5 \div 1,5) \cdot 10^{-3}$ м] образуется зона повышенной температуры (факел реакции) с последующим прожогом стенки соседней трубки. В дальнейшем были предприняты широкие исследования по выявлению основных эффектов, сопровождающих малые течи. При этом использовали опыты как на мишенях, так и на моделях, имитирующих узлы парогенераторов.

Влияние размеров течи и расстояния между образцами на интенсивность разрушения различных материалов [6] изучали на мишенях при температуре натрия до 500°C и расходе водяного пара в диапазоне $0,001\text{—}0,011$ кг/с с использованием перлитных (1X2M), ферритных (0X12H2M), аустенитных (1X18H10T) и высоконикелевых (саникро-31) сталей. Установлено, что максимальная скорость коррозионно-эрозионного повреждения соответствует отношению расстояния между мишенью и соплом к диаметру сопла, равному 25.

Стойкость к разрушению у высоконикелевой стали выше, чем у сталей 1X18H10T, 0X12H2M и 1X2M (по скорости выноса массы стали из зоны воздействия продуктов реакции) примерно в 2,5; 3,5 и 6 раз соответственно.

Исследование влияния температурного, фазового и геометрического факторов на интенсивность разрушения материала в зоне малой течи применительно к условиям парогенератора БН-350 позволило объяснить характер и скорость развития аварий на парогенераторах. Установлено также, что независимо от температурного режима малая течь в газовой полости не сопровождается ее заметным саморазвитием и коррозионно-эрозионным повреждением элементов трубного пучка.

Изучению вопросов эволюции течей были посвящены специальные исследования. Показано решающее влияние температуры натрия на процесс саморазвития течи на перлитных (1X2M), аустенитных (X18H10T) и высоконикелевых (X20H40B) сталях. Снижение температуры с 45 до 300°C сопровождается уменьшением скорости саморазвития течи почти на порядок независимо от типа стали. Установлено, что при истечении воды, содержащей до 5 мас. % гидроксида натрия, в воздух через отверстие в стали типа 1X2M наблюдается саморазвитие течи.

На основании этого можно предполагать, что решающим фактором, влияющим на увеличение размера течи во времени, является проникновение щелочи, образующейся в результате реакции натрия с водой в канале истечения.

Для парогенератора установки БН-350 было проведено модельное изучение динамики повреждаемости трубок при возникновении малой течи. Установлена характерная для этой конструкции закономерность развития малой течи во времени. Анализ наблюдавшихся в парогенераторах аварийных ситуаций и сравнение полученных результатов с экспериментом подтвердили возможность прогнозирования динамики аварийных процессов путем их изучения на моделях парогенератора.

Исследованиями малых течей в трубных досках [7, 8] установлено, что разрушение материалов происходит только в случае образования локальных лучевых струй, разрушения не происходит, если течь наблюдается по периметру соединения трубки с трубной доской. Металлографические исследования образцов показали, что, как и для течей в трубках, происходит фронтальное разрушение на перлитных сталях и по границам зерен — на аустенитных сталях.

Экспериментальные исследования течей воды в натрий были проведены также и на моделях обратной конструкции (натрий в трубках, вода в межтрубном пространстве). Установлено, что, если в аварийном режиме в обратном парогенераторе расход натрия через аварийный канал сохраняется, то с увеличением течи более 0,001 кг/с скорость износа стали в канале приближается к скорости в обычной конструкции. В диапазоне течей 10^{-4} — 10^{-3} кг/с скорость износа материала в обратном парогенераторе почти на порядок меньше, чем в прямом.

Если при течи воды в натрий в аварийном канале устанавливается режим «закупорки», то скорость коррозионно-эрозионного разрушения в месте течи падает с увеличением расхода воды, в отличие от роста износа в прямой конструкции.

Наблюдались режимы, в которых скорости разрушения материала в обратном парогенераторе как при закупорке, так и при проточке теплоносителя оказывались равны. Однако они все же оставались меньшими, чем в условиях прямого парогенератора.

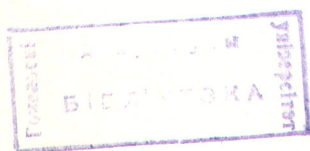
Расчетно-теоретические исследования в области малых течей воды в натрий до настоящего времени в СССР проводились в направлении разработки методов расчета параметров в факеле реакции для получения дополнительных

данных (наряду с экспериментальными) по выяснению механизма разрушения материала. Предложена методика, позволяющая на основе закономерностей турбулентного переноса тепла и массы рассчитывать поля концентраций, температур и скоростей в области факела реакции [9].

К настоящему времени разработаны критерии и методы обработки экспериментальных данных для формирования требований к системам аварийной защиты парогенератора в режиме «малая течь». Характеристики системы аварийной защиты парогенератора считаются удовлетворительными, если время сквозного повреждения стенки соседней (с текущей) трубки меньше суммарного времени обнаружения течи и опорожнения пароводяной полости. Для получения этого суммарного времени применительно к условиям анализируемой конструкции парогенератора используются два метода. Первый метод основывается на двух экспериментальных зависимостях: закономерности увеличения течи во времени (саморазвитие) и зависимости повреждения материала от размера течи (течь постоянна во времени для каждой точки этой зависимости). Путем совместной обработки указанных данных находятся искомые параметры, характеризующие аварийный режим и требования к системам защиты натриевых парогенераторов. Именно таким образом был исследован аварийный режим малой течи применительно к парогенератору установки БН-350.

Второй метод исходит из предположения, что во всем интервале процесса повреждения стенки соседней трубки первоначально возникшая течь остается постоянной. В качестве исходных зависимостей используются экспериментально определяемая связь между отрезком времени от момента возникновения малой течи до момента резкого ее увеличения и размером первоначальной течи (опыты проводятся при минимальном попадании воды в натрий), а также соотношение между размером постоянной во времени течи и скоростью разрушения материала соседней трубки. Если время существования такой течи на постоянном уровне больше, чем время разрушения стенки трубки при этом, в качестве предельно допустимого принимается время разрушения. При обратном соотношении в качестве определяющей величины принимается время существования течи на постоянном уровне.

Подобным методом выполнен анализ режима малой течи для парогенератора БН-600.



Конструкция парогенератора и аварийные процессы. Требования к системе аварийной защиты и разработки ее элементов. Как известно, первые конструкции парогенераторов натрия — вода, реализованные в СССР на АЭС БОР-60 и БН-350, являются парогенераторами корпусного типа. В конструкциях этого типа практически невозможно локализовать зону разрушения или поврежденный элемент, и поэтому при возникновении любой течи воды в натрий на аварийный режим выходит весь парогенератор. В связи с особенностью конструкции была разработана соответствующая система аварийной защиты (САЗ), которая должна своевременно формировать аварийный сигнал при любом первоначальном размере течи воды в натрий (при возникновении малых течей не допускать их перехода в большие), а также обеспечивать безопасность конструкции после получения аварийного сигнала. Основные характеристики САЗ (компенсационные объемы, быстродействие арматуры по воде, число и характер предохранительных устройств, гидравлические характеристики сбросных линий, сепарирующих устройств, расширителей и т. д.) должны удовлетворять заранее заданным требованиям с учетом возможного режима «большая течь».

Как показал опыт эксплуатации парогенераторов БН-350, разработанная САЗ удовлетворительно справилась с задачей предотвращения разрушения элементов натриевого контура при больших течах. Однако в режиме малых течей при работе парогенератора на повышенных уровнях температуры система аварийной защиты не предотвращала перехода малой течи в большую. Это связано главным образом с тем обстоятельством, что во время разработки и монтажа БН-350 (1965—1971 гг.) не было еще известно характерное время саморазвития малых течей.

Стремление ограничить зону реакции взаимодействия натрия с водой в пределах небольшого элемента, составляющего только часть парогенератора, а также соображения технологического порядка привели в дальнейшем к созданию конструкций, теплообменная поверхность которых размещается в небольших модулях, объединенных в секции (секционные парогенераторы) [10]. Как известно, на АЭС БН-600 предполагается использовать парогенератор секционного типа [11]. Основным режимом работы САЗ этого парогенератора при появлении течи в одной из секций является вывод из работы всего парогенератора. Наличие отсе-

кающей арматуры по пароводяному и натриевому трактам каждой секции позволяет отсекать аварийную секцию после остановки парогенератора с последующим его запуском на работоспособных элементах. В качестве вспомогательного режима САЗ (в случае своевременного обнаружения аварийной секции на уровне малой течи) предполагается использовать алгоритм отключения поврежденной секции «на ходу».

В настоящее время в СССР разрабатывается система аварийной защиты секционных парогенераторов с учетом условий отключения аварийной секции без остановки парогенератора при любой течи. При этом основными требованиями к САЗ являются [12]:

а) в момент получения сигнала о наличии течи в парогенераторе подсистемой формирования аварийного сигнала должна быть обеспечена уверенная избирательность (идентификация аварийной секции);

б) аварийная секция после ее обнаружения должна быть своевременно изолирована от основного контура и оставшихся работоспособных секций парогенератора (т. е. до момента достижения максимально допустимого коррозионно-эрозионного износа элементов конструкции или допустимого загрязнения теплоносителя основного контура продуктами реакции);

в) критерием быстрогодействия при отключении аварийной секции по натриевому и пароводяному трактам должно являться предотвращение попадания продуктов реакции из аварийной секции в основной циркуляционный контур в режиме «большая течь» (мгновенное и полное разрушение одной трубки);

г) система защиты должна предотвращать повышение давления над предельно допустимым не только в основном натриевом контуре, но и в отключаемой секции, т. е. обеспечивать безопасность аварийного элемента;

д) независимо от размера течи должно быть обеспечено своевременное и полное дренирование теплоносителей изолированной секции по пароводяному и натриевому контурам и заполнение их объемов инертной атмосферой.

Необходимые характеристики элементов САЗ (чувствительность и инерционность системы индикации больших и малых течей, быстродействие арматуры и др.), удовлетворяющие приведенным выше требованиям, определяются с учетом процессов коррозионно-эрозионного разрушения материала в зоне течи, а также параметров натриевого и пароводяного трактов паро-

генератора [12]. Опыт эксплуатации парогенераторов установки БН-350 подтвердил необходимость своевременного дренирования теплоносителя с продуктами реакции, так как длительное нахождение коррозионно-активных продуктов в пределах аварийной зоны приводило к значительным вторичным коррозионным разрушениям элементов трубного пучка.

Как показывает анализ, использование секционных парогенераторов с соответствующей САЗ позволяет сократить время воздействия продуктов реакции на конструктивные элементы аварийной секции и уменьшить общее загрязнение натриевого контура даже с учетом развития течи во времени (малые объемы натрия и воды в пределах аварийной секции и использование быстродействующей арматуры ведут к быстрому осушению секции по обоим контурам и изоляции ее от работоспособных элементов). В связи с этим появляется принципиальная возможность упрощения системы индикации малых течей за счет применения быстродействующих устройств при некотором снижении требований к их чувствительности (использование упрощенных акустических систем, магнитных расходомеров и т. п.).

В настоящее время в СССР ведется разработка элементов системы аварийной защиты для парогенераторов натрия — вода в нескольких направлениях. Для индикации малых течей внедряются системы по измерению концентрации водорода в натрии и газовых полостях. Концентраметрические устройства основаны на применении диффузионных мембран (в натрии или газе) в комплексе с магниторазрядным насосом. Чувствительность системы индикации водорода в натрии, полученная с учетом возможных выбросов сигнала при длительности испытания 1000 ч, составляет $5 \cdot 10^{-6}$ мас.%. Комплекс работ на БН-350 показывает, что в промышленных условиях возможно достижение чувствительности $\sim (1 \div 2) \cdot 10^{-6}$ мас.%. Чувствительность устройств индикации водорода в газе составляет 10^{-3} об.%, что при существующих фоновых концентрациях можно считать вполне приемлемым. В области разработки акустических систем выполнен комплекс работ по изучению шумов оборудования на БР-10, БОР-60, БН-350, а также анализ шумов собственно течей воды в натрий на моделях. Для индикации больших течей в парогенераторах используют устройства, регистрирующие изменение давления в газовых полостях, а также расход натрия в секциях (для секционных конструкций). В качестве предохранительных

устройств в САЗ парогенераторов используются мембраны в газовых полостях с принудительным или самопроизвольным разрывом. Для аварийного осушения пароводяного контура применяется арматура с гидроприводом при быстроте действия до 5 с. Применительно к секционным конструкциям разрабатывается быстродействующая натриевая арматура. В системах сброса и сепарации продуктов реакции используется концепция двухступенчатой сепарации за счет изменения направления и скорости движения газожидкостной смеси. Устройства циклонного типа не применяются.

Выводы. Результаты экспериментальных исследований на моделях, расчетные исследования на основании разработанных методик, а также анализ аварийных режимов на парогенераторах БН-350 позволяют в настоящее время довольно полно представлять развитие аварийных процессов при различных течах воды в натрий (большие и малые течи). Опыт БН-350 имеет принципиальное значение с точки зрения возможности сочетания натрия и воды в схеме АЭС и обоснованности их разделения через одну стенку в парогенераторах промышленного типа. Установлено, что даже при значительном попадании воды в натрий аварийные процессы возможно удержать в натриевом контуре без его разрушения.

Имеющиеся в настоящее время знания об аварийных процессах, связанных с течью воды в натрий, дают возможность сформулировать основные требования к парогенератору и его системе аварийной защиты (чувствительность приборов индикации течи, быстродействие предохранительных устройств, характеристики сбросных и сепарационных устройств и т. п.), позволяющие не только обеспечить безопасность АЭС, но и свести к минимуму объем разрушения элементов парогенератора и степень загрязнения теплоносителя продуктами реакции в аварийном режиме. В связи с этим определенные преимущества имеют секционные конструкции парогенератора с соответствующей системой защиты, которые позволяют локализовывать аварийные эффекты в пределах поврежденной секции и обеспечивать (в случае необходимости) безостановочную эксплуатацию парогенератора на работоспособных секциях независимо от размеров начальной течи воды в натрий.

Поступила в Редакцию 17.IV.78

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Т

1. Поплавский В. М. и др. «Теплоэнергетика», 1966, т. 6, с. 70.
2. Лейпунский А. И. и др. «Атомная энергия», 1967, т. 22, вып. 1, с. 13.
3. Багдасаров Ю. Е. и др. Технические проблемы реакторов на быстрых нейтронах. М., Атомиздат, 1969.
4. Лукаевич Б. И. и др. In: Proc. Study Group Meeting on Steam Generators for LMFBR'S. Bensberg, 14—17 Oct. 1974, p. 239.
5. Поплавский В. М. и др. «Атомная энергия», 1971, т. 30, вып. 2, с. 191.
6. Мазанов А. С. и др. [4], с. 129.
7. Козлов Ф. И. и др. In: Proc. US/USSR Seminar on the Development of Sodium — Cooled Fast Breeder Reactor Steam Generators. Los-Angeles, 2—4 Dec. 1974, p. 367.
8. Поплавский В. М. и др. В кн: Состояние и перспективы работ по созданию АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. Т. II. Обнинск, изд. ФЭИ, 1975, с. 518.
9. Петухов В. В. и др. [7], с. 540.
10. Титов В. Ф. и др. [8], т. I, с. 608.
11. Титов В. Ф. и др. [7], с. 243.
12. Поплавский В. М. и др. [7], с. 488.

УДК 621.039.515

Точность регулирования нейтронного поля ядерного реактора

ПЛЕХАНОВ Л. П.

Одним из путей улучшения экономических показателей энергетических реакторов является повышение точности пространственного регулирования нейтронного поля. Решение этой задачи достигается созданием систем регулирования поля, имеющих несколько датчиков и регуляторов. Проблемам построения таких систем посвящен ряд работ [1—5], в которых рассматриваются вопросы проектирования, устойчивости систем, теоретического и экспериментального исследования их поведения.

Однако некоторые важные вопросы в этой области еще недостаточно разработаны. Одним из них является зависимость статической точности регулирования от числа и расположения датчиков и регулирующих органов (РО), от погрешности датчиков, зон нечувствительности регуляторов и др.

В настоящей статье выясняются закономерности, определяющие статическую точность регулирования нейтронного поля.

Постановка задачи. Пусть отклонение поля $\Delta\Phi(r)$ от номинального распределения описывается в стационарном состоянии и с учетом внутренних обратных связей линейной краевой задачей:

$$\begin{aligned} L(\Delta\Phi) &= f(\Delta\alpha); \\ B[\Delta\Phi(r)] &= 0, \quad r \in \Gamma, \end{aligned} \quad (1)$$

где Γ — граница активной зоны; L и B — линейные операторы; f — оператор; $\Delta\alpha(r)$ — изменение коэффициента размножения нейтронов (возмущение).

Предполагается, что возмущение ограничено одним из двух неравенств с известными пра-

выми частями:

$$|f[\Delta\alpha(r)]| \leq F(r); \quad (2a)$$

$$\int \{f[\Delta\alpha(r)]\}^2 dV(r) \leq A^2. \quad (2б)$$

Здесь и дальше все интегралы взяты по объему активной зоны.

Система регулирования задается следующими данными. В точках r_i активной зоны расположены N_d датчиков ($i = 1, 2, \dots, N_d$), имеющих погрешность δ_i . Сигнал i -го датчика после сравнения с номинальным значением подается на k -й регулятор с весовым коэффициентом c_{ki} . Число регуляторов равно N_p . Регулятор с номером k управляет одним РО (например, стержнем), расположенным в точке ξ_k ($k = 1, 2, \dots, N_p$), и имеет погрешность регулирования (или зону нечувствительности) Δ_k .

Предполагается, что система регулирования устойчива и форма РО в геометрии задачи (1) меняется мало. Требуется оценить установившуюся погрешность регулирования $\Delta\Phi(r)$ в любой точке r активной зоны в зависимости от погрешностей регуляторов Δ_k , погрешностей датчиков δ_i и возмущения $\Delta\alpha$.

Исходные уравнения. Будем считать, что однородная задача, соответствующая формуле (1), не имеет нетривиального решения. Это справедливо для большинства реакторов, работающих в энергетическом режиме (о противоположном случае см. примечание в конце статьи). Искомую погрешность регулирования можно