

УДК 621.311.2:621.039+621.039.566

ПОСЛЕЧЕРНОБЫЛЬСКИЙ ПЕРИОД НА КУРСКОЙ АЭС.  
НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

*Гальберг В.П. (Курская АЭС)*

В статье рассматривается период более широкий, чем последнее десятилетие. Примерно 17 лет назад на Курской АЭС начались работы, так или иначе связанные с последующей за аварией на Чернобыльской АЭС модернизацией. Многолетняя работа проводилась значительным коллективом. Считаем уместным назвать работников Курской АЭС, занимавших наиболее активные позиции в разработках и их реализации: В.А. Щиголев, В.В. Карнаухов, В.М. Ряхин, Ю.Л. Дорош, Н.А. Букреев, П.Т. Николаев, Ю.И. Слепоконь, Т.П. Николаев, Ю.Н. Филимонцев, Ю.Б. Чижевский, С.А. Полянский, Ю.С. Филиппов, А.А. Быбко, А.В. Гальберг, М.Г. Андреев, В.В. Волков, А.Э. Речкиман, В.И. Денежкин, П.А. Бурков, В.В. Стасенко, В.М. Коробкин.

Некоторые разработки до аварии на Чернобыльской АЭС. До 1986 г. персонал Курской АЭС не воспринимал свою деятельность по модернизации систем безопасности как предотвращение будущей катастрофы, но в целом работа была направлена на устранение именно тех просчетов в конструкции и организации эксплуатации, которые в своем сочетании и привели к аварии. Сегодня уместно перечислить основные из них:

удлинение поглощающей части стержней СУЗ задолго до истечения их ресурсного срока;

автоматический ввод в активную зону стержней СУЗ типа УСП;

смещение вниз верхних концевиков стержней автоматического регулирования для исключения ввода положительной реактивности при движении стержней в активную зону и смещенном вниз аксиальном нейтронном поле;

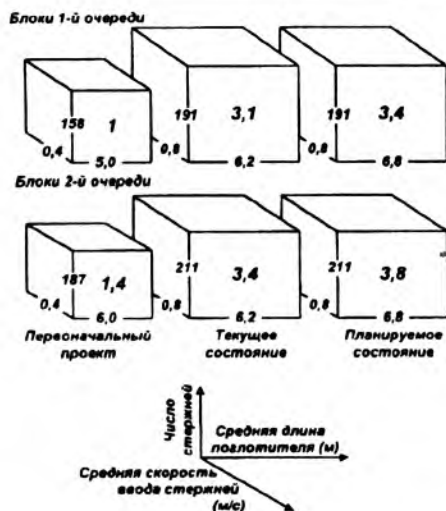
натурные испытания стержней жидкостного регулирования, разработанных НИКИЭТом, использование стержней подобного типа в аварийной защите.

Все эти инженерные решения были приняты и реализованы после аварии на Чернобыльской АЭС на всех АЭС с РБМК как основные меры, повышающие эффективность СУЗ.

**Повышение эффективности фундаментальных функций безопасности.** Изложение в этом разделе построено по принципу сравнения способов реализации каждой из трех функций безопасности для следующих состояний АЭС: первоначальный проект, текущее состояние после уже осуществленных мероприятий по повышению безопасности, запланированное состояние после завершения реконструкции, модернизации и технического перевооружения.

**Повышение эффективности аварийной защиты.** Основные характеристики эффективности — число стержней-поглотителей, участвующих в аварийной защите, длина и скорость их введения в активную зону. Эффективность функций безопасности пропорциональна произведению этих трех чисел. Эффективность аварийной защиты для проектного варианта блоков первого поколения принята за 1, повышенная эффективность стержней нового типа учтена путем увеличения эффективной длины. Из рис. 1 видно, что эффективность выполнения первой функции безопасности уже на

\*Журнальный вариант.



Р и с. 1. Первая функция безопасности — эффективность аварийной защиты

ла достигнута промежуточная цель — доведение парового коэффициента до уровня, исключающего быструю кинетику реактора, т.е. менее 1. Этим было достигнуто главное — отрицательная обратная связь по мощности во всех осмысленных режимах. Достижение конечной цели — доведение до 0,3 и менее оказалось затянутым. Налицо несоответствие между ожидаемым от загрузки топлива повышенного обогащения и реальным паровым коэффициентом. Была сделана попытка найти причину несоответствия, анализируя принятую методику его определения. Прежде всего обратили внимание на то, что при прочих равных условиях результат зависит от пространственной формы возмущения паросодержания в активной зоне реактора. Основным вывод исследований — констатация высокой степени консерватизма при использовании штатной методики измерения парового коэффициента и, как следствие, уверенность, что достигнутая эффективность аварийной защиты превышает необходимую.



Р и с. 2. Вторая функция безопасности — эффективность САОР

сегодняшний день возросла более чем в 2—3 раза, планируется ее дальнейшее повышение. Кроме этого повышена надежность автоматического срабатывания аварийной защиты за счет введения дополнительных каналов и комплектов аварийной защиты, дополнительных сигналов, инициирующих ее действие, ужесточения уставки срабатывания (по скорости нарастания мощности в 2 раза, повышению давления в реакторном пространстве в 2,7 раза, в помещенных контура — в 2,5—6,7 раза), исключения схемы совпадений для аварийных сигналов от разных параметров, аварийная защита действует по каждому параметру в отдельности. Необходимая эффективность аварийной защиты непосредственно связана со свойствами активной зоны. Основная задача, решение которой растянуто на годы, — приведение одного из основных реактивных коэффициентов (парового) до идеального, близкого к нулю. Быстро была достигнута эффективность аварийной защиты превышает необходимую.

*Перспективы повышения эффективности САОР.* Характеристики ее эффективности следующие: запас воды в гидробаллонах, время разворота дизель-генераторов, суммарная производительность насосов аварийного отвода тепла. Для блоков 3—5 эта система полностью с полутонным запасом обеспечивает отвод тепла при разрыве трубопроводов самого большого диаметра 1000 мм (коллекторы ГЦН) и удовлетворяет требованиям современных норм. Эффективность системы для блоков первого поколения примерно вчетверо меньше, чем для второго. Эта система способна справиться с аварией при мгновенном разрыве трубопровода КМПЦ диаметром не выше 300 мм. Поэтому планы реконструкции САОР направлены в основном на реконструкцию этих систем блоков 1, 2. После реконструкции эффективность САОР будет примерно такой же, как и блоков 3—5 (рис. 2).

*Перспективы повышения эффективности функции локализации* Характеристики ее эффективности таковы: запас воды в бассейне-барботере, суммарная производительность насосов системы отвода тепла от бассейна-барботера, число одновременно разрушенных каналов, выход радионуклидов из которых локализуется полностью или частично (без угрозы для целостности радиационной защиты реактора) (рис. 3).

Разработки, связанные с повышением эффективности контроля за реакторной установкой. Еще одно направление на стыке технических средств и организации эксплуатации связано с технологией АЭС — перспективное и текущее планирование перегрузок топлива, расчетная поддержка систем контроля СКАЛА и некоторые другие процессы.

Их далеко не полный перечень таков:

выбор оптимальных решеток дополнительных поглотителей для снижения парового коэффициента реактивности для всех блоков (совместно с ВНИИАЭС и НИКИЭТом), оптимального соотношения между числом стержней УСП и РР для блоков первой очереди (совместно с ВНИИАЭС и НИКИЭТом), оптимальной решетки высотных родиевых датчиков КНИ-7 для блока 2 (эта задача решалась в рамках более общей задачи повышения эффективности аварийной защиты за счет установки дополнительных 12 стержней СУЗ, осуществлено совместно с НИКИЭТом и Ленинградским институтом «Атомэнергопроект»), оптимальной решетки комбинированной системы автоматического регулирования нейтронного потока для блока 3 (осуществлено совместно с НИКИЭТом и Московским отделением «Атомэнергопроекта»);

детальная проработка замены каналов на блоке 1 с полной выгрузкой половины активной зоны. Зеркальная перестановка топлива (осуществлено совместно с НИКИЭТом);

модернизация системы контроля герметичности оболочек твэлов (СКГО) для блока 4 (осуществлено совместно с ИАТЭ);

разработка пассивного метода определения парового коэффициента реактивности (совместно с ВНИИАЭС).

Непрерывное ведение перегрузок топлива, разнообразие типов стержней, значительная степень самостоятельности оператора при управлении этими стержнями, динамические характеристики, связанные с реактивностными эффектами, предъявляющие особые требования к системе контроля за распределением энерговыделения в РБМК.

В первые годы эксплуатации АЭС с РБМК сложная и требующая особой квалификации часть общей технологии — расчетная, непосредственным образом влияющая и на эффективность топливоиспользования, и на безопасность, слабо регламентировалась. Не было обоснованных требований к планированию перегрузок. Не проводилось математическое моделирование для прогнозирования состояния активной зоны после перегрузок. Не предполагалось и не предусматривалось проектом использование общестанционной вычислительной техники. При достаточно строгой регламентации деятельности персонала СЦК СКАЛА и СФКРЭ расчетная поддержка СКАЛЫ на сторонних ЭВМ была в значительной мере стихийной. Речь идет о базовых нейтронно-физических расчетах, результаты которых вводятся в основную технологическую программу ПРИЗМА и периодически обновляются. Все определялось расположением АЭС, наличием и мощностью вычислительных средств или средств передачи данных. Кур-



Р и с. 3. Третья функция безопасности — эффективность СЛА

ская АЭС в первые годы использовала модемы, затем построила собственный ВЦ. Этому предшествовали технико-экономические исследования, которые подтвердили необходимость собственного ВЦ, уточнили число ЭВМ и их производительность. В качестве критерия оптимизации была выбрана глубина выгорания топлива как функция точности восстановления поля энерговыделения, которая в свою очередь связана с частотой проведения базовых физических расчетов.

Опыт эксплуатации РБМК за 10-летний после аварии на Чернобыльской АЭС период показал, что ситуация с критерием оптимизации оказалась значительно сложнее, другими словами, не прост ответ на вопрос: «В чем заключается практическая польза от повышения точности системы контроля за распределением энерговыделения и коэффициентов запаса до кризиса кипения?»

*По глубине выгорания.* Универсальным показателем эффективности сжигания ядерного топлива в активной зоне является отношение средней глубины выгружаемого топлива к средней глубине выгорания активной зоны. По этому критерию Курская АЭС достигла высокого значения 1,83. К сожалению, в официальных данных по другим АЭС в числителе присутствует рециркуляционная составляющая движения топлива через активную зону, что сильно занижает показатель. Поэтому делать вывод об экспериментальном подтверждении причинно-следственной связи повышением точности контроля за энерговыделением и ростом глубины выгорания было бы некорректно.

*По надежности оболочек твэлов.* Некоторые выводы можно сделать, опираясь на следующие факты:

на всех АЭС с РБМК первые годы эксплуатации характеризуются переходом от повышенной интенсивности отказов оболочек до некоторого стационарного уровня, который принимался за приемлемый. Исключение составляла Смоленская АЭС, которая с самого начала имела невысокую интенсивность отказов, значительно меньшую, чем на других АЭС. Этот факт коррелирует с тем, что здесь до пуска первого блока был введен в эксплуатацию стационарный вычислительный центр и организована постоянная расчетная поддержка для планирования перегрузок и оперативной программы ПРИЗМА, т.е. постоянно погрешность восстановления полей энерговыделения поддерживали на предельно достижимом низком уровне;

Курская АЭС организовала аналогичную расчетную поддержку на собственном ВЦ через 6 лет после пуска и еще через 3 года сравнивалась со Смоленской АЭС по интенсивности отказов оболочек твэлов;

при освоении проектной мощности Игналинской АЭС имела место повышенная интенсивность отказов в узком диапазоне мощности, примыкающем к 100%;

после снижения мощности РБМК первого поколения до 70% (по требованию ГАН) статистически значимого снижения интенсивности отказов оболочек твэлов не было даже после полной замены топлива.

Эти бесспорные факты приводят к следующим выводам:

действительно приемлема концепция пороговой мощности (или линейной нагрузки), превышение которой приводит со значительной вероятностью к нарушению целостности оболочки твэлов (концепция Я.В. Шевелева). Поток отказов при этом коррелирует с математическим ожиданием мощности и точностью, с которой эта мощность определяется. Однако с уверенностью о существовании такой корреляции можно говорить лишь для мощности, превышающей максимальную проектную. Отдельные каналы при работе реактора на номинальной мощности и снижении точности восстановления энерговыделения могут попасть в эту область;

есть некоторая минимальная погрешность восстановления энерговыделения, ниже которой не обнаруживается корреляция между этой погрешностью и интенсивностью отказов оболочек твэлов. Это значение безусловно не ниже достигнутой на сегодняшний день погрешности ПРИЗМЫ, поддерживаемой комплексом нейтронно-физических расчетов.

Однако авария на Чернобыльской АЭС выявила еще один аспект, который можно сформулировать как влияние точности восстановления полей энерговыделения на последствия тяжелой аварии.

Критерии глубины выгорания и надежности оболочек твэлов связаны с эффективностью топливоиспользования. Второй критерий хотя и связан с целостностью второго барьера безопасности, но эта связь нейтрализуется при нормальных условиях эксплуатации системами КГО, РЗМ и УПАК. Однако есть первый барьер — топливная таблетка, целостность которой напрямую не контролируется ни на одном серийном реакторе. Контроль герметичности оболочек есть некоторый интегральный показатель целостности первого и второго барьеров. Для нормальной эксплуатации это значения не имеет, но ситуация меняется коренным образом, если происходит массовое разрушение оболочек при аварии с нарушением теплоотвода в одном или нескольких каналах. Последствия такой аварии напрямую зависят от целостности топливных таблеток. Разрушающим фактором для таблетки служит температура, а механизм разрушения близок к пороговому. Таким образом, возникает проблема влияния точности восстановления энерговыделения на целостность первого барьера безопасности. Задача расчетного сопровождения приобрела новую актуальность и на гораздо более высоком уровне. В настоящее время решение выглядит следующим образом. Совместными усилиями Курской АЭС, РНЦ «Курчатовский ин-т» и ВНИИАЭС принята стратегия привела к разработке и внедрению программного комплекса ЭНЕРГИЯ, в основе которого лежит модельный нейтронно-физический расчет активной зоны. Особую эффективность этому комплексу придает межмашинная связь штатных ЭВМ СКАЛА с локальной сетью, в которую включены и ПЭВМ, и ЕС ЭВМ. Мониторы установлены на оперативных блочных щитах, в помещениях физиков, кабинетах главного инженера и его заместителей по безопасности и эксплуатации. Самая свежая информация о состоянии энергоблоков поступает помимо вычислительного комплекса системы СКАЛА и в локальную сеть. Комплекс ЭНЕРГИЯ включает в себя несколько подсистем, основными из которых являются следующие:

**ОПЕРА** — автоматизированное планирование перегрузок топлива;

**ОПТИМА** — базовый нейтронно-физический расчет с оптимизацией радиального профиля нейтронного поля, обеспечивающий необходимую точность штатной программы ПРИЗМА;

**ПРИЗМА-ДУБЛЕР** — дублирование расчетных функций СЦК СКАЛА по штатным алгоритмам ПРИЗМА, повышающее оперативность расчета в 10—15 раз;

**ПОЛАРИС** — трехмерный контроль за распределением линейных нагрузок на твэл — подсистема информационной поддержки оператора.

Программный продукт с такими возможностями верифицирован. Кроме обычного сравнения с полями, восстановленными системой СКАЛА, и показаниями высотных датчиков проведено сравнение с результатами «горячего сканирования» (активационным методом и малогабаритными перемещаемыми камерами) в каналах, удаленных от штатных высотных датчиков. Кроме того были проверены прогнозирующие возможности программы ПОЛАРИС сравнением энергораспределения, прогнозируемого программой и реально восстановленного СЦК СКАЛА после введения возмущения (перемещения стержней СУЗ и перегрузки ТВС).

Установлено, что результаты восстановления радиального энергораспределения по программам ПОЛАРИС и ПРИЗМА не имеют статистически значимого различия — дисперсия разницы не превышает дисперсии восстановления поля программой ПРИЗМА. Сравнение с методами непосредственного инструментального измерения распределения высотного поля (активационный метод) показало, что отклонение не превышает 5%. Сравнение с моделированием отключения штатного 7-секционного высотного датчика показало, что даже в случае максимально возможного удаления несовпадение не превышает 8%. Программа показала хорошие прогнозирующие возможности — максимальное отклонение прогнозной оценки показаний радиальных датчиков при

моделировании работы реактора в течение 18 эф. сут составило 5% реальных значений. В программе ПОЛАРИС удачно соблюдается преемственность матобеспечения. В основу положена проверенная многолетней практикой программа эксплуатационных нейтронно-физических расчетов ВОРК (разработка НИКИЭТа). Однако иницированы и новые подходы. Примером является все шире применяемый на Курской АЭС программный комплекс BARS—COTT, разработанный специалистами РНЦ «Курчатовский ин-т». В адаптации и верификации этого комплекса непосредственное участие принимали и специалисты Курской АЭС.

Исследования физических характеристик активной зоны. Сразу после аварии на Чернобыльской АЭС началась реализация программы по снижению парового коэффициента реактивности. Через 2 года  $\alpha_p$  снизился на  $2-3 \beta_{\text{эф}}$ , что резко повысило безопасность, но создало новую проблему — снижение подкритичности остановленного и разотравленного реактора. Механизм этого ясен — исчез эффект введения значительной порции отрицательной реактивности при замене пара на воду в процессе остановки реактора. Для реакторов второй очереди, обладающих существенным запасом по подкритичности (более эффективная СУЗ), проблемы не было, требуемые правилами 2% подкритичности обеспечивались с избытком. Однако для реакторов первой очереди проблема приобрела остроту, как следствие повысились требования к точности определения подкритичности реактора, возникла необходимость после остановки вводить в активную зону дополнительные поглотители, чтобы обеспечить возможность проведения ремонтных работ. Проблема носила явно выраженный комплексный характер, поэтому была разработана программа ее решения, включающая аппаратные и расчетные исследования. Аппаратные разработки были выполнены совместно с МИФИ, РНЦ «Курчатовский ин-т» и ВНИИАЭС. В основу была положена хорошо себя зарекомендовавшая система КЕНТАВР. Результаты нейтронно-физических экспериментов, а также расчетно-теоретических исследований привели к формулировке принципов формирования активной зоны во время эксплуатации:

формирование должно сопровождаться предварительным математическим моделированием трех состояний активной зоны: критического, с полностью извлеченными и погруженными стержнями СУЗ;

критерием оптимальности формирования является совпадение радиального профиля энерговыделения в каждом из трех состояний с заданным профилем  $Q_{03}$ . Фактически таким путем решается многокритериальная задача, а именно заданный оптимальный профиль  $Q_{03}$  обеспечивает оптимальное топливоиспользование, постоянство профиля при разных положениях стержней страхует от локальной критической массы, отсутствие локальностей обеспечивает наибольшую подкритичность при остановке реактора (любая локальность действует только в одну сторону — уменьшает подкритичность), постоянство профиля обеспечивает постоянство формфактора (по крайней мере по радиусу), что приближает реальный реактор к точечной модели. Это повышает достоверность измерения подкритичности.

На первый взгляд, выполнение последнего принципа невозможно. Однако это не так. С помощью трех способов управляющих воздействий на активную зону — распределения выгорания, дополнительного поглощения и положения стержней можно добиться этого принципа «с точностью до микроструктуры». Этот процесс итерационный, т.е. сам принцип носит стратегический характер и рассчитан на долговременное планирование. В практическом плане он реализуется заданием допустимого радиального коэффициента неравномерности нейтронного поля для каждого из состояний. Постепенное его уменьшение отражает последовательность в реализации этого принципа. На сегодняшний день мы имеем предельные значения 1,4—1,45, 1,8—2,1 и 2,6—3 для модели критического состояния, с извлеченными и погруженными стержнями соответственно.

Еще одна серия исследований связана с определением парового коэффициента реактивности. Установлено, что результаты эксперимента по определению парового

коэффициента зависят от того, каким образом вносится возмущение паросодержания внутри активной зоны. Способы внесения такого возмущения ограничены технологией. Существенное отличие имеют два способа: вариация расхода питательной воды и теплоносителя через активную зону. Учитывая, что на мощности возможны два режима с двумя и тремя ГЦН на каждой стороне реактора, в эксперименте при мощности не выше 60% можно получить три существенно разные вариации высотного распределения истинного объемного паросодержания в активной зоне путем изменения расхода питательной воды при работе двух ГЦН на стороне, подключения еще по одному ГЦН и изменения питательной воды при работе трех ГЦН. Эти вариации  $\Delta\varphi = f(z)$  линейно независимы и поэтому могут использоваться для составления системы из трех линейных уравнений, решением которой являются три эмпирических коэффициента пространственной зависимости некоторого «локального» парового коэффициента реактивности. В качестве аргумента этой зависимости априорно могут быть выбраны локальная плотность распределения внешнего поглотителя (карбида бора, бористой стали, воды), глубина выгорания топлива, некоторая линейная комбинация первого и второго.

Исследован первый вариант и получены квадратичные зависимости локального коэффициента реактивности от плотности распределения поглотителя по высоте активной зоны. Результат такого приближения оказался представительным, коэффициенты — значимыми с высокой доверительной вероятностью. На основании этого была построена высотная зависимость локального парового коэффициента реактивности. Основной результат — знакоперсменность. В тех местах, где плотность распределения внешнего поглотителя высока (верх и низ активной зоны), локальный паровой коэффициент отрицателен. В средней части активной зоны плотность распределения внешнего поглотителя наименьшая, и локальный паровой коэффициент положителен. Этим объясняется разница в результатах измерения парового коэффициента при различных способах определения. общепринятый способ основан на изменении расхода питательной воды при неизменном расходе теплоносителя. Изменение паросодержания связано только с колебаниями температуры воды на входе в активную зону. Вариация паросодержания по высоте имеет отчетливо выраженный максимум в районе границы между экономайзерной и испарительной зонами и резкий спад в испарительной части в сторону выхода из активной зоны. Такая вариация паросодержания фактически зондирует активную зону в узкой области начала испарения. Вариация паросодержания по высоте во втором способе также имеет максимум в начале испарительного участка и спад в сторону выхода из активной зоны, но гораздо более слабый. Поэтому второй вариант определения парового коэффициента реактивности в значительно большей степени зондирует верхние слои активной зоны, имеющие отрицательные значения локального парового коэффициента, в итоге результирующее значение меньше, чем в первом варианте.

Исследования герметичности оболочек твэлов. *Статистический анализ нарушений герметичности оболочек твэлов.* Мы имеем дело с многомерными наблюдениями за объектами, которыми являются негерметичные ТВС, появляющиеся в единицу времени (год). Отбракованные ТВС характеризуются числом признаков ( $P_1, P_2, \dots, P_K$ ). Процедура относится к разделу дискриминантного анализа и состоит в том, что пространство признаков разбивается на  $M + 1$  область:  $A_0, A_1, A_2, \dots, A_M$  так, что при попадании объекта в область  $A_i (i = 1, 2, \dots, M)$  принимается решение об отнесении объекта к  $i$ -й совокупности, при попадании в область  $A_0$  отказываемся от классификации. При этом предполагается существование некоторой распознающей (дискриминантной) функции, но при удачном графическом изображении распределений необязательно иметь формальную запись функции, так как глаз обладает отличными распознающими свойствами.

Выбраны следующие признаки:  $P_1$  — год изготовления ТВС;  $P_2$  — год выгрузки негерметичной ТВС из реактора;  $P_3$  — тип топлива (начальное обогащение  $^{235}\text{U}$ );  $P_4$  — принадлежность к блоку;  $P_5$  — энерговыработка ТВС;  $P_6$  — местоположение в активной зоне (номер зоны профилирования расхода, расстояние до дополнительного поглотителя, стержня СУЗ);  $P_7$  — сроки и типы промывок контура;  $P_8$  — сроки и число замененных обойм верхних трактов;  $P_9$  — наличие сверхнормативных по длительности ремонтных остановок. Для областей  $A_1, A_2, \dots, A_M$  выбраны совокупности (классы) статистически значимого влияния следующих факторов:  $A_1$  — начальный период эксплуатации блока;  $A_2$  — программа реформирования активной зоны (массовая замена топлива, массовая установка дополнительных поглотителей, значительное наращивание оперативного запаса реактивности);  $A_3$  — точность восстановления распределения энерговыделения;  $A_4$  — тепловая мощность реактора;  $A_5$  — критерий выгрузки ТВС в связи с негерметичностью;  $A_6$  — местоположение в активной зоне;  $A_7$  — промывки контура;  $A_8$  — замена обойм;  $A_9$  — длительные остановки для ремонта;  $A_{10}$  — тип ТВС.

Результаты дискриминантного анализа показали, что в начальном периоде эксплуатации блока (до 800 эф. сут) наблюдается повышенная интенсивность отказов оболочек твэлов с последующим ее снижением. Статистические характеристики отказов схожи с аналогичными характеристиками других однотипных элементов, часть их имеет скрытые заводские дефекты. В этом отношении кажется, что твэлы не являются чем-то исключительным, т.е. в начальном периоде эксплуатации они имеют убывающую  $\lambda$ -характеристику, что похоже на отбраковку твэлов со скрытыми дефектами. Значительное изменение состава и свойств активной зоны, усложнение ее загрузки приводит к увеличению интенсивности отказов твэлов. Речь идет о переходе на топливо обогащением 2% вместо 1,8% в период с 1980 по 1984 гг. на блоках 1 и 2, снижении парового коэффициента реактивности путем массовой установки дополнительных поглотителей и увеличения оперативного запаса реактивности в период с 1986—1987 гг. и переходе на топливо обогащением 2,4% вместо 2% с 1988 г. При каждой из этих перестроек наблюдалось повышение интенсивности отказов. Дискриминантный анализ на данном этапе не дает ответа на вопрос, почему такая связь есть. Однако правдоподобной выглядит гипотеза, что эта связь осуществляется по следующей цепочке:

усложнение загрузки активной зоны;



более сложная микроструктура нейтронного поля  
плюс повышение частоты перегрузок;



уменьшение частоты базовых физических расчетов  
(запаздывания в обновлении констант ПРИЗМЫ)  
плюс повышение методической погрешности нейтронно-физических расчетов;



снижение точности восстановления энерговыделения по программе ПРИЗМА;



увеличение ширины распределения мощности в каналах при заданной средней мощности;



увеличение доли каналов, имеющих повышенную мощность;



увеличение интенсивности отказов.

Мы называем это гипотезой потому, что анализ не даст положительного ответа на непосредственный вопрос о значимой зависимости между интенсивностью отказов и точностью восстановления полей энерговыделения (область  $A_3$ ). Однако он не дает и отрицательного ответа, что означает необходимость выделения более информативных признаков. Такие признаки можно найти за пределами Курской АЭС: на начальных этапах эксплуатации Смоленской АЭС с полностью освоенным расчетным сопровождением программы ПРИЗМА. На этой АЭС отсутствует характерный убывающий начальный участок  $\lambda$ -характеристики. Похоже, что сам факт наличия скрытых дефектов твэлов не есть достаточное условие их отбраковки на начальном этапе эксплуатации. Качественное распределенное регулирование нейтронного поля может компенсировать в какой-то мере существование подобных дефектов и продлить время жизни твэлов, имеющих такие дефекты.

Анализ показал отсутствие статистически значимой связи между интенсивностью отказов и тепловой мощностью реактора в диапазоне 70—100%. На первый взгляд, это противоречит наличию связи между интенсивностью отказов и точностью восстановления полей энерговыделения. Однако на самом деле противоречия нет, а есть пороговый характер связи между мощностью твэлов и вероятностью отказа. Непосредственным подтверждением такой концепции является опыт Игналинской АЭС — статистически значимое увеличение интенсивности отказов твэлов в узком диапазоне мощности реактора, примыкающем к 100%. По другим факторам выводы следующие: влияние критерия выгрузки ТВС — в 1993 г. на Курской АЭС ужесточены критерии и естественно повысилось число выгружаемых ТВС; не установлена связь между интенсивностью отказов и такими факторами, как расположение ТВС в активной зоне (номер зоны профилирования расхода, расстояние до дополнительного стержня с поглотителем, стержня СУЗ), начальное обогащение (сильно маскируется другими факторами), длительность остановки на ремонт (также маскируется другими факторами).

*Разработки в области контроля герметичности оболочек твэлов.* К ним относятся:

метод выявления ТВС с негерметичными твэлами с последующей их выдержкой в этом состоянии и контролем на герметичность после восстановления циркуляции на остановленном и расхоленном реакторе. Самый чувствительный из массовых методов;

метод выдержки выгруженных ТВС в пенале с последующим  $\gamma$ -спектрометрическим анализом воды из пенала;

метод локального возмущения мощности — регистрация изменений выхода продуктов деления при возмущении мощности исследуемого канала с помощью ближайшего к нему стержня. В результате повышается надежность выявления негерметичных ТВС;

увеличение энергетического окна  $\gamma$ -квантов до 0,3—1,5 МэВ вместо проектного 0,25—0,75 МэВ, что вдвое повысило чувствительность системы КГО;

контроль активности эжекторных газов, что повысило оперативность регистрации факта разгерметизации ТВС;

метод поиска негерметичных ТВС с помощью амплитудного анализатора на базе ЭВМ. В настоящее время находится в опытно-промышленной эксплуатации на блоке 4 автоматизированный комплекс с IBM-PC, аналогичный комплекс монтируется на блоке 2.

**Исследования формоизменений в активной зоне.** *Развитие инструментального парка.* Для контроля за формоизменениями в активной зоне измеряются следующие геометрические параметры:

внутренний диаметр графитовой колонны и канала на разной высоте и азимуте для оценки остаточного зазора в системе технологический канал — графитовая кладка; пространственное искривление каналов и кладки для недопущения контакта твэлов со стенками каналов и затирания стержней СУЗ;

остаточное зацепление в телескопическом узле графитовая колонна — верхний тракт для недопущения сго расстыковки.

Первые диаметромеры, созданные в ПРП БАЭР, позволили еще в 1990 г. предварительно оценить срок начала массовой замены технологических каналов на блоке 1. Ко второму поколению можно отнести красноярские установки, обладающие высокой степенью автоматизации, в которых сигнал автоматически вводится в компьютер, результат выводится в виде готового документа. К третьему поколению мы относим установку разработки ИАТЭ, характеризующуюся тем, что для повышения точности измерений и надежности при эксплуатации используется гидравлический способ формирования выходного сигнала. Кривизну измеряли приборами двух поколений: инклинометрами маятникового типа с индукционными способами передачи сигнала разработки ПРП БАЭР и инклинометрами гидравлического типа разработки ИАТЭ. Для измерения остаточного зацепления в телескопическом узле используется токовихревой метод, реализованный в установках ВНИИАЭС (1-е поколение) и НИКИЭТа (2-е поколение). Заслуживает особого внимания предложение МИФИ, которое позволит непосредственно регистрировать контакт «большого» графитового кольца с наружной стенкой канала и, более того, степень плотности контакта.

*Динамика формоизменений в активной зоне.* К моменту принятия решения об остановке первого блока для замены каналов накопилась статистика в несколько десятков измеренных ячеек (канал + колонна + телескоп). В результате обработки результатов измерений получены следующие выводы:

медианное значение критической энергонаработки канала блока 1 при исчерпании зазора составляет 12 400 МВт·сут;

зацепление телескопического соединения в большинстве ячеек гарантировано, в связи с чем работы по реконструкции этого узла могут быть перенесены на более поздний период эксплуатации (при некоторых компенсирующих мероприятиях, связанных с дополнительным объемом контроля);

значительных формоизменений, связанных с кривизной колонн и каналов, нет и не ожидается.

Исследования, связанные с последним выводом, выходят за рамки геометрических измерений. Они особенно интересны, так как для прогнозирования искривления графитовых колонн требуется знание динамики межблочного зазора, который в принципе не измеряется. Априорно можно представить два сценария радиационных формоизменений графитовых колонн:

усадка с уменьшением всех геометрических размеров и увеличением плотности графита. Это благоприятный сценарий, так как зазоры между колоннами увеличиваются;

оседание колонны при неизменной плотности графита. При этом измеряемые параметры могут вести себя точно так же: уменьшаются высота колонны и диаметр отверстия в графитовых блоках. Однако при этом увеличивается наружный размер блока в горизонтальном сечении. Это могло бы привести к исчерпанию межблочного зазора и последующему искривлению колонн. Поэтому нельзя было дать надежного прогноза,

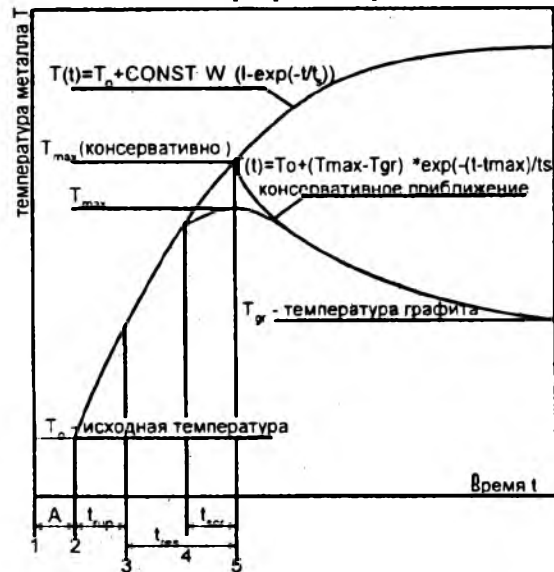
основанного только на геометрических измерениях без исследования физико-механических свойств облученного графита. По предложению и техническому заданию Курской АЭС совместно с ПРП БАЭР была разработана и изготовлена специальная установка для отбора проб графита на различных высотных отметках. Насколько нам известно, отбор графитовых образцов из активной зоны эксплуатируемого реактора проводился впервые в практике эксплуатации канальных реакторов. Исследования образцов, проведенные в РНЦ «Курчатовский ин-т», привели к благоприятному заключению: плотность графита увеличилась примерно пропорционально кубу уменьшения линейных размеров. Это означает усадку и как следствие увеличение межблочных зазоров.

Исследования, связанные с оценкой масштаба последствий запроектных аварий с нарушением баланса между энерговыделением и теплосъемом. В общем случае проблема множественного разрушения каналов требует серьезных стендовых и специальных математических исследований. Причина — в сложности процессов, приводящих к разрушению, и сложности самого процесса разрушения, связанного с высокотемпературной ползучестью циркония, особенно с учетом влияния на процесс деформирования блоков графитового замедлителя и колец. Однако в одном важном случае задача может быть значительно упрощена, для чего было постулировано несколько условий.

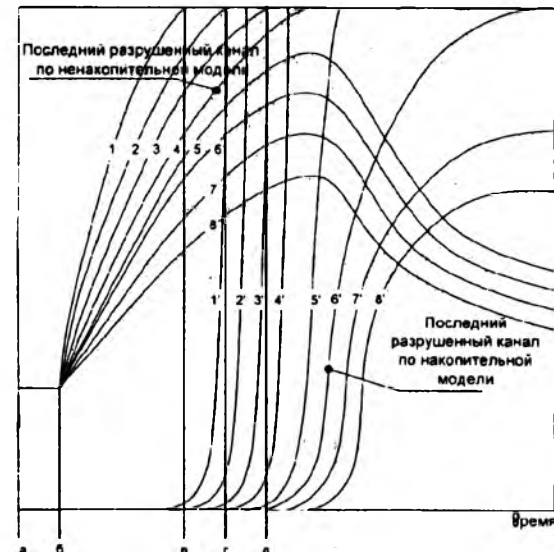
1. В момент времени  $t_{st}$  происходит отказ в системе циркуляции теплоносителя через группу каналов, связанных с какой-то общей причиной, например, неожиданным блокированием расхода через раздаточно-групповой коллектор или локальным увеличением энерговыделения, нарушающим баланс между генерацией тепла и теплосъемом в некотором районе. Теплоноситель в этой группе каналов переходит в состояние перегретого пара. Резко уменьшается коэффициент теплопередачи, и температура стенок каждого канала из этой аварийной группы начинает монотонно расти. Если бы все каналы этой группы находились в строго одинаковых условиях и их термомеханические свойства были бы также строго одинаковы, то по достижении критического разрушающего критерия все каналы этой группы разрушились бы одновременно. Важным для дальнейшего изложения является факт того, что одновременное разрушение каналов в этих условиях не зависит от реального механизма разрушения, т.е. от вида критерия разрушения. Однако реально аварийные каналы находятся в разных условиях, т.е. температура в них растет с разным темпом. Кроме этого, они имеют некоторый разброс термомеханических характеристик. Поэтому постулируем: если разрушение каналов произошло, то независимо от механизма разогрева каналов аварийной группы и механизма разрушения металла имеется канал, разрушенный первым.

Сформулируем задачу так: в аварийной группе произошло разрушение первого канала. Этот первый канал необязательно является и последним среди разрушенных. Сколько каналов разрушится дополнительно? Можно говорить о некотором параметре — запасе живучести, значение которого обозначим  $\alpha$ . Естественно принять для первого разрушенного канала  $\alpha = 0$ , для остальных каналов аварийной группы  $\alpha > 0$ . После постулированной гибели лидера гибнет еще несколько каналов, попадающих в некоторую область  $0 < \alpha < \alpha_{ruin}$ . Каналы аварийной группы образуют статистическое распределение  $P(\alpha)$ , где  $\alpha$  — некоторый запас живучести;  $P(\alpha)$  — доля общего числа каналов аварийной группы, имеющих запас живучести менее  $\alpha$ . Решением поставленной задачи является  $P(\alpha_{ruin})$ . Чем шире плотность распределения, тем меньшая доля каналов попадает в эту область. Если ширина распределения равна нулю, то гибнут все. Если есть ярко выраженный лидер, например, в одном из каналов расход снизился до нуля, а в остальных значительная доля циркуляции сохранилась, то гибнет этот лидер, давая сигнал на остановку реактора и «спасая» остальные каналы. Реальное решение находится в промежутке. Размер «гибельной» области зависит от скорости

протекания теплофизического процесса и быстроты реакции аварийной защиты. Скорость процесса характеризуется временем от начала роста температуры каналов до разрушения первого из них  $t_{\text{гип}}$ . Быстрота реакции характеризуется промежутком времени от момента разрыва первого канала до момента значительного снижения мощности  $t_{\text{рес}}$ . Размер области  $\alpha_{\text{руин}} = f(t_{\text{гип}}, t_{\text{рес}})$  тем больше, чем меньше  $t_{\text{гип}}$  и чем больше  $t_{\text{рес}}$ . Запас живучести зависит от многих факторов, каждый из которых имеет свое распределение вероятностей. Если эти факторы статистически независимы, например, мощность каналов и их температура разрушения, то дисперсии соответствующих распределений вероятностей складываются. Другими словами, неизвестная нам дисперсия запаса живучести есть сумма многих положительных чисел. Если не учитывать какой-то фактор, это приведет к искусственному уменьшению ширины плотности распределения запаса живучести, т.е. к консервативной оценке числа разрушенных каналов.



Р и с. 4. Динамика температуры неразрушенного канала при прекращении расхода через раздаточно-групповой коллектор: 1 — стоп-расход; 2 — начало перегрева пара (начало отсчета); 3 — момент разрыва аварийного канала; 4 — начало движения стержней СУЗ; 5 — начало снижения температуры; А — вытеснение воды из канала



Р и с. 5. Иллюстрация к детерминированной математической модели разрушения трубы: 1—8 — температура металла в каналах в порядке убывания их мощности; 1'—8' — деформация металла в каналах в порядке убывания их мощности; а — стоп-расход; б — начало перегрева пара; в — разрушение первого канала; г — давление в реакторном пространстве достигает уставки; д — начало движения стержней

2. Первый канал, разрушаясь, приводит в действие аварийную защиту реактора. Она действует не сразу после момента разрушения канала, а с определенным запаздыванием (рис. 4). Запаздывание включает в себя как минимум две составляющие: газодинамическую задержку, связанную с заполнением паром реакторного пространства. По данным технико-экономического обоснования она не превышает 2 с; аппаратурную, являющуюся суммой времени прохождения сигнала по импульсным трубкам, рельсным цепям и времени разворота якорей сервоприводов стержней-поглотителей. По результатам многих испытаний она не превышает 2 с.

С момента действия быстродействующей аварийной защиты динамика процесса резко меняется. Температура стенок каналов продолжает некоторое время расти, достигает максимального значения и затем начинает уменьшаться, асимптотически приближаясь к температуре графита, находящегося в непосредственной близости к каналам (рис. 5). Результат решения задачи зависит от того, к какой категории отно-

газодинамическую задержку, связанную с заполнением паром реакторного пространства. По данным технико-экономического обоснования она не превышает 2 с;

аппаратурную, являющуюся суммой времени прохождения сигнала по импульсным трубкам, рельсным цепям и времени разворота якорей сервоприводов стержней-поглотителей. По результатам многих испытаний она не превышает 2 с.

С момента действия быстродействующей аварийной защиты динамика процесса резко меняется. Температура стенок каналов продолжает некоторое время расти, достигает максимального значения и затем начинает уменьшаться, асимптотически приближаясь к температуре графита, находящегося в непосредственной близости к каналам (рис. 5). Результат решения задачи зависит от того, к какой категории отно-

сится критерий разрушения. Ненакопительные механизмы допускают отступление от порога разрушения, например, разрушающая температура или любой параметр, связанный с ней функционально (предел прочности). При ненакопительном механизме разрушения дополнительно к первому разрушаются все каналы, температура которых достигла температуры первого в момент его разрушения. Остальные не пересекнут разрушающую границу и останутся целыми. Если механизм накопительный (например, окисление или высокотемпературная ползучесть), то рост разрушающего фактора продолжается некоторое время и в процессе снижения температуры. Отсюда следует, что число каналов, достигших разрушающей границы, в случае накопительного механизма разрушения будет всегда больше, чем при ненакопительном.

3. Важным условием решения поставленной задачи является постулирование идентичности разрушающего фактора (критерия разрушения) и его значения для всех разрушенных каналов аварийной группы. Это дает два преимущества, упрощающие решение. Во-первых, резко сужается необходимость использования конкретных значений разрушающего фактора. При анализе ненакопительного механизма разрушения такая необходимость вообще исчезает. Нужная информация о деталях процесса разрушения сосредоточена в постулированном факте разрушения первого канала. Во-вторых, постулированная идентичность типа критерия и его критического значения есть определенная идеализация и повод для критики. Однако мы исходили из следующих соображений: процесс быстропротекающий, что позволяет считать давление до разрушения во всех каналах одинаковым и неизменным, реальный статистический разброс термомеханических характеристик не коррелирует с условиями, в которых находятся аварийные каналы, поэтому если не учитывать такого фактора, то искусственно сужается плотность распределения запаса живучести и результат приобретает консерватизм.

Нетрудно предсказать при уменьшении консерватизма посредством введения статистических характеристик распределения термомеханических свойств, что вероятностный результат носил бы крайне расплывчатый характер, дающий повод для бесконечных дискуссий. Поэтому целесообразно опереться на простоту и определенность — запас живучести  $i$ -го канала, меру отставания от лидера в аварийной группе каналов по энергонапряженности (мощности)  $\alpha_i = (1 - W_i/W_{\max})$ , где  $W_i$  — мощность  $i$ -го канала в аварийной группе;  $W_{\max}$  — мощность наиболее энергонапряженного канала в этой группе. Такой подход позволяет использовать готовый результат — в технико-экономическом обосновании приведена гистограмма распределения каналов по мощности, которая легко пересчитывается в  $P(\alpha)$ . Это распределение на Курской АЭС применено к теоретическому исследованию последствий запроектной аварии, связанной с блокированием расхода через раздаточно-групповой коллектор.

Для математического описания процесса разогрева трубы канала использованы результаты моделирования аварии на Ленинградской АЭС в марте 1992 г. с помощью кодов RELAP в РНЦ «Курчатовский ин-т». Анализ этих результатов показывает:

при полном блокировании расхода две расчетные схемы — с учетом и без учета лучистого переноса тепла дают существенно различные результаты. Однако даже незначительный проток воды (5%) резко снижает лучистый теплообмен, преобладающим в этом случае является конвективный. Это означает возможность исключения существенного нелинейного звена при математическом описании процесса;

рост температуры стенок трубы в первые 10 с есть непрерывный процесс с постепенным уменьшением скорости роста и явным стремлением к пределу. Зависимости с такими свойствами хорошо аппроксимируются суммами экспонент с отрицательными показателями. Такого же типа суммы являются результатом действия линейных дифференциальных операторов первого порядка. Процесс теплопередачи в многослойных средах описывается таким же оператором. Это дает основания для утверждения: основная доля информации, полученная по кодам RELAP, заключена в уравнении теп-

лопередачи  $[A]T = Q$ , где  $[A]$  — линейный дифференциальный оператор с действительными неотрицательными корнями характеристического уравнения;  $T$  — вектор температуры, его компоненты есть температура характерных областей (таблетки, оболочки твэла, трубы, графита);  $Q$  — тепловой вектор (вектор источника), его компоненты — собственное энерговыделение в этих областях (цепная реакция деления,  $\gamma$ -разогрев). Действительность корней характеристического уравнения отражает отсутствие осцилляций температуры (для этого нет физических оснований), а неотрицательность исключает ее безграничный рост. В последнем постулированном свойстве специфика поставленной задачи заключается в том, что рассматривается авария, связанная с нарушением циркуляции теплоносителя, а не реактивная авария. Решение становится простым при одном естественном допущении. Поскольку характерное время теплового переходного процесса в графите в 100 раз больше интересующего интервала времени (десятки минут против десятков секунд), считаем температуру графита постоянной. Тогда решение имеет вид

$$\alpha_{\text{рун}} = 1 - \frac{1 - \exp(-t_{\text{рун}}/t_s)}{1 - \exp(-t_{\text{рун}}/t_s - t_{\text{рес}}/t_s)}.$$

Решение содержит в себе параметр  $t_s$  — характерное время тепловой системы, состоящей из урановых таблеток, оболочек твэлов, перегретого пара, стенки канала и окружающего графита. Эта величина, являющаяся масштабом процесса, определена нами из условий наилучшего приближения к результатам моделирования по RELAP, благодаря чему в максимальной степени используются результаты расчетов РНЦ «Курчатовский ин-т».

Поскольку  $t_s$  является характеристикой системы, а не режима, результаты такого приближения не должны зависеть от режима. Действительно, получилось хорошее совпадение для всех расчетных режимов. Значение  $t_s$  составило  $36 \pm 1$  с. Такой узкий диапазон свидетельствует о правильности выбора модели на основе линейного дифференциального оператора. Величина  $t_{\text{рун}} = 40$  с взята из результатов исследований РНЦ «Курчатовский ин-т» для мощности 1,95 МВт.

Анализ решения дает интересный факт: можно условно считать действие стержней на мощность мгновенным, но увеличить время запаздывания аварийной защиты на величину, равную характерному времени снижения мощности (в  $e$  раз). Это должно быть учтено в  $t_{\text{рес}}$  как дополнительная составляющая. Для быстрой аварийной защиты она составляет 1 с. Используя  $P(\alpha)$  и полученное соотношение для  $\alpha_{\text{рун}}$ , получаем, что масштаб последствий соответствует пяти разрушенным каналам. Этим исчерпывается исследование разрушения каналов для случая ненакопительного механизма разрушения (разрушающая температура).

Однако эксперименты НИКИЭТа и ЭНИЦ (Электрогорск) показывают, что на самом деле механизм разрушения накопительный, непосредственно связан с высокотемпературной ползучестью циркония. В этом случае задача усложняется, необходима какая-то математическая модель ползучести, но наши исследования моделей ползучести привели к выводу: с каким бы темпом ни росла температура трубы канала и какая бы из известных моделей ползучести ни использовалась, наиболее драматическая часть сценария разрушения (если разрушение произошло) разворачивается на последних нескольких десятках градусов (от трех до семи). Именно в этом диапазоне накапливается почти вся деформация. Вывод подтверждается экспериментами. Важность этого вывода в следующем: все, что сказано относительно ненакопительного механизма разрушения, применимо к механизму разрушения, связанному с высокотемпературной ползучестью при условии некоторой добавки к времени запаздывания аварийной защиты. Таким образом, задача резко упрощается и сводится к нахождению этой дополнительной составляющей времени задержки.

При исследовании использована простейшая модель кинетики ползучести  $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \exp\left[-(Q - V\sigma)/RT\right]$ , где  $\dot{\epsilon}$ ,  $Q$  — относительная скорость и энергия активации ползучести соответственно;  $V$  — присоединенный объем;  $\sigma$  — напряжение в металле трубы;  $\dot{\epsilon}_0$  — величина, обратная периоду свободных колебаний атомов циркония, или количество межатомных расстояний, пролетаемых в единицу времени свободным атомом ( $10^{12} \text{ с}^{-1}$ ).

Мы сознательно не использовали скрупулезные зависимости (ВНИИНМ, АЕСЛ). Их особенность — крайне громоздкий вид. В желании максимально близко описать экспериментальные данные  $\dot{\epsilon}(\sigma, T)$  этим зависимостям придется вид, непригодный для аналитических исследований. Однако в основе лежит тот же кинетический подход, и фактически главные свойства определяются экспоненциальным множителем  $\exp(-Q/RT)$ . Поэтому выводы, полученные нами, универсальны и подтверждаются экспериментами. Основные из них:

учет накопительного механизма разрушения, связанного с высокотемпературной ползучестью циркония, эквивалентен некоторому дополнительному времени запаздывания аварийной защиты в ненакопительной модели. Это дополнительное время составляет 4—6 с. Полное число разрушенных каналов не превышает девяти, что укладывается в пропускную способность страховой системы паросброса из реакторного пространства в ее окончательном варианте;

реализация не предусмотренной первоначальным проектом аварийной защиты по сигналу снижения расхода через раздаточно-групповой коллектор предотвращает разрушение каналов при условии выдачи сигнала не позднее чем через 15 с после блокирования расхода. Однако оболочки твэлов гораздо более критичны к задержке сигнала, поэтому указанная задержка является верхним пределом, но чем она меньше, тем меньше процент разгерметизации твэлов;

если в процессе высокотемпературной ползучести обезвоженного канала исчезает зазор, то нагрузка от внутреннего давления перераспределяется со стенки трубы на графитовые блоки за короткое время, составляющее сотые доли от времени исчезновения зазора. Это определяет сценарий разрушения канала как трехстадийный: первая стадия — равномерное вздутие нагреваемого канала под действием внутреннего давления до момента плотного контакта с графитовыми блоками (десятки секунд), вторая — короткий промежуток времени, в течение которого нагрузка передается на графитовые блоки (в пределах секунды) и происходит разрушение блоков, третья — нагрузка после разрушения блоков вновь передается на циркониевую трубу. Возможно, процесс носит мгновенный характер, в этом случае имеем дело с разновидностью удара — мгновенно приложенной нагрузкой, что ставит трубу в особо тяжелые условия с последующим ее разрушением. Результаты стендовых экспериментов НИКИЭТа совпадают с этим расчетно-теоретическим результатом;

имеет место существенная зависимость температуры разрушения трубы и времени до разрушения от напряжения в металле и скорости нагрева, но кроме качественного вывода теория предлагает и аналитическую связь между этими параметрами:

$$\ln \frac{t_1}{t_2} \approx \ln \frac{k_2}{k_1} \approx \frac{(Q - V\sigma)}{R} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right),$$

где  $t_1$ ,  $t_2$ ;  $k_1$ ,  $k_2$ ;  $T_1$ ,  $T_2$  — время до разрушения, скорость разогрева и температура разрыва трубы соответственно.

Из этой зависимости, в частности, следует, что температура разрушения трубы тем выше, чем выше скорость нагрева. Это также совпадает с результатами стендовых экспериментов НИКИЭТа.

**Закключение.** Авария на Чернобыльской АЭС вызвала резонанс во всей мировой ядерной энергетике, в наибольшей степени на АЭС с РБМК. Мы рассчитываем, что статья в какой-то мере повлияет на позиции и специалистов, и неспециалистов в отношении более объективных оценок уже достигнутого уровня безопасности и перспектив его дальнейшего повышения.

УДК 621.311.2:621.039.003.13

## ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ АЭС РОССИИ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕХОДА К РЫНОЧНОЙ ЭКОНОМИКЕ

*Игнатенко Е.И., Трунов В.М., Шаров Е.И. (Концерн «Росэнергоатом»)*

Структура топливно-энергетического баланса и конъюнктура цен на энергоносители. В усредненном мировом топливно-энергетическом балансе преобладает нефть (40%), затем следуют уголь и газ (30 и 20% соответственно), замыкающими являются гидро- и ядерные энергоресурсы. Вследствие этого цены мирового рынка на энергоресурсы формируются исходя из стоимости нефти — доминирующего энергоносителя, и существенное изменение цены на нефть влечет за собой изменение уровня цен на другие энергоносители, например, газ (причем с годичным запаздыванием, как показывает анализ конъюнктуры мирового рынка 70—80-х гг.). В топливно-энергетическом балансе России доминирует газ (62% в 1996 г.), затем следуют нефть и уголь (около 30 и 10% соответственно). Поэтому формирующей основой цен на энергоносители для внутреннего рынка России должен быть именно газ со всеми вытекающими последствиями для цен на остальные органические энергоресурсы.

Из международной практики известно, что цены на газ с учетом его потребительских качеств существенно выше цен на уголь (в среднем на 30%). Однако для России в переходных условиях к рыночной экономике государство участвует в регулировании цен на продукцию предприятий топливно-энергетического комплекса как представителей естественных монополий, причем степень его участия различна для разных энергоресурсов. В настоящее время цены на уголь свободные и находятся на уровне мировых при низком качестве отечественного угля, при этом структурная перестройка убыточной угольной отрасли требует больших дотаций и финансовой поддержки. Цены на газ в результате государственного регулирования искусственно сдерживаются, сейчас они установились на уровне 50 дол./т усл. топл., что ниже цен на отечественный уголь и существенно ниже цен за рубежом (примерно в 1,5—2 раза).

Кроме того, при прогнозировании цен на российский газ следует учитывать необходимость освоения новых труднодоступных месторождений Крайнего Севера, причем не только для обеспечения запланированного роста, но и для поддержания добычи на ныне достигнутом уровне. Совокупность этих факторов, а также ужесточение экологических нормативов при добыче и транспортировке газа позволяют заключить, что на ближайшую перспективу цены на газ в России будут существенно возрастать.

История развития энергетики мира показывает непрерывный переход на все более энергонасыщенное топливо: дрова, уголь, нефть, газ, атом, и этот список будет продолжен. При этом «отыгравший» свою доминирующую роль энергоресурс полностью не исчерпывается, а плавно занимает свою специфическую и, как правило, более цивилизованную нишу в энергобалансе и промышленности. Ретроспективный анализ показывает, что будущее за интенсивной технологией, к которой относится ядерная энергетика.

Энергосбережение, экология и конкурентоспособность. Как ни парадоксально это звучит, ядерная энергетика удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к энергосберегающей технологии, т.е. минимальному потреблению энергии на собст-