

- ИНЭИ РАН — Московская школа управления Сколково, 2019.
5. **Адамов Е.О., Каширский А.А., Муравьев Е.В., Толстоухов Д.А.** Структура и параметры двухкомпонентной ядерной энергетики при переходе к замыканию ядерного топливного цикла. — Изв. РАН. Энергетика, 2016, № 5, с. 14—32.
  6. **Адамов Е.О., Рачков В.И., Толстоухов Д.А., Панов С.А.** Сравнение технико-экономических показателей различных вариантов реализации ЯТЦ реакторов АЭС. — Там же, № 4, с. 25—36.
  7. **Renewable Power Generation Costs in 2018.** Abu Dhabi: IRENA, 2019.
  8. **Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis.** Ver. 13. USA: Lazard, 2019.
  9. **Макаров А.А., Веселов Ф.В., Макарова А.С. и др.** Стратегические перспективы электроэнергетики России. — Теплоэнергетика, 2017, № 11, с. 40—52.
  10. **Veselov F., Khorshev A.** Integrated modelling and information technology for strategic planning in the energy sector of Russia. — In: 2017 IEEE 11th Intern. Conf. on Application of Information and Communication Technologies (AICT), Moscow, p. 1—5.
  11. **Makarov A.A., Veselov F.V., Makarova A.S., Urvantseva L.V.** Comprehensive assessment of Russia's electric power industry's technological transformation. — Therm. Engng, 2019, v. 66, p. 687—701.
  12. **Стратегия** развития ядерной энергетики России до 2050 года и перспектива на период до 2100 года. М.: ГК «Росатом», 2019.

Поступила в Редакцию 26.03.20

УДК 621.039.586

## ОЦЕНКА ЦЕЛОСТНОСТИ ФИЗИЧЕСКИХ БАРЬЕРОВ БЕЗОПАСНОСТИ РБМК В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОГО ОБЕСТОЧИВАНИЯ ЭНЕРГОБЛОКА

*Бубнова Т.А., Каплиенко А.В., Никитин Ю.М., Слободчиков А.В., Умяров Р.М.*

*(АО «НИКИЭТ», г. Москва)*

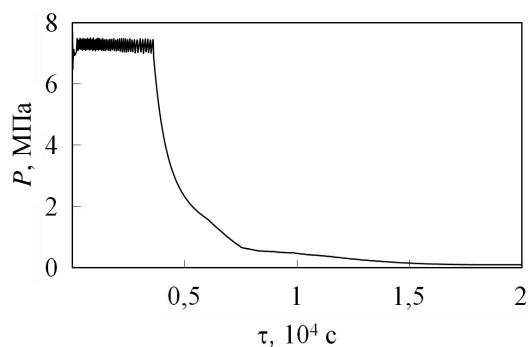
*e-mail: bubnova@nikiet.ru*

Эффективность управления запроектной аварией с полным обесточиванием энергоблоков РБМК определяется степенью повреждения физических барьеров безопасности. Такими барьерами являются оболочки твэлов, каналные трубы, прежде всего в условиях перегрева, и реакторное пространство. Оценка целостности физических барьеров безопасности в условиях полного длительного обесточивания энергоблока предполагает, как правило, анализ двух последовательных этапов управления аварией, обеспечивающих конструктивную целостность реактора: декомпрессию контура циркуляции и восстановление охлаждения реактора в условиях последующего разогрева подачей холодной воды насосами системы аварийного охлаждения или от передвижных насосных установок, если они будут задействованы.

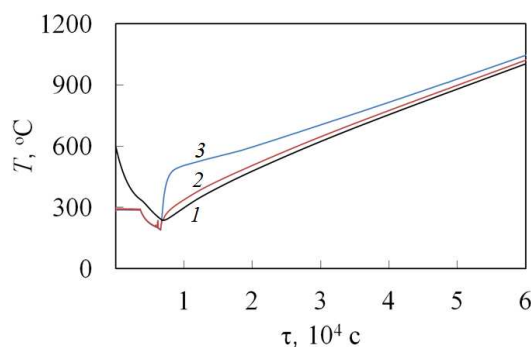
Подача воды в разогревающийся реактор сопряжена с переопрессовкой каналных труб из-за всплеска давления в контуре циркуляции при интенсивном выпаривании воды и с возможной переопрессовкой реакторного пространства, обусловленной дисбалансом между истекающим в него теплоносителем в случае множественного образования свищей в каналных трубах и сбросом теплоносителя через

систему защиты реакторного пространства. Факторами, влияющими на всплеск давления в контуре циркуляции при восстановлении охлаждения реактора, являются аккумулированное тепло (температура) графитовой кладки, расход воды, подаваемой на охлаждение активной зоны, и пропускная способность паросбросных устройств (БРУ-К).

Оценка последствий управляющих действий выполнена применительно к модели 3-го энергоблока Курской АЭС с использованием кода RELAP5/mod 3.2 для состояния реактора после его автоматического останова (исходное событие — полное обесточивание энергоблока), сброса оператором давления в контуре многократной принудительной циркуляции открытием одного клапана БРУ-К через 1 ч после исходного события для предупреждения возможного перегрева каналных труб при высоком давлении, обезвоживания и последующего разогрева активной зоны в диапазоне температуры графитовой кладки до 1000 °С [1, 2]. Основными регистрируемыми параметрами состояния активной зоны являются температура графитовой кладки и давление в контуре циркуляции. Изменение давления в контуре циркуляции и максимальной температуры элементов активной



Р и с. 1. Давление в контуре циркуляции



Р и с. 2. Максимальная температура графитового блока (1), канальной трубы (2), оболочки твэла (3) канала мощностью 2 МВт при запроектной аварии с полным обесточиванием энергоблока

зоны для канала средней мощности 2 МВт показано на рис. 1, 2. Такое изменение параметров относится к режиму обесточивания с множественными отказами оборудования. Прежде всего это отказ на автоматическое срабатывание системы аварийного охлаждения реактора, невозможность использования пассивной подачи воды в реактор из питательного тракта и отказ на штатное введение в работу дизельных передвижных насосных установок.

Выбор верхнего значения температуры графитовой кладки 1000 °С для оценки безопасности обусловлен ограничением приведенного анализа для состояния активной зоны без диффузионного выхода продуктов деления из топлива и экспериментальными данными о повреж-

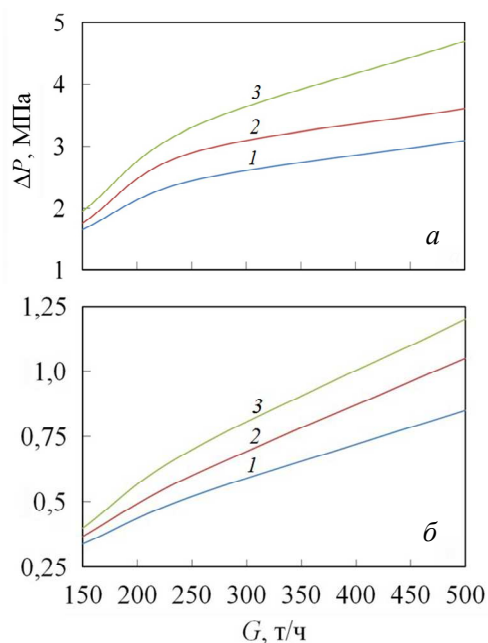
дении канальных труб до температуры 1000 °С [3]. Анализ деформационных нагрузок в канальных трубах при восстановлении охлаждения реактора проведен для трех исходных состояний реакторной установки, которые соответствуют температуре графитовой кладки 700, 800 и 1000 °С. Температура выбрана с учетом уменьшения предела текучести  $\sigma_{T_{0,2}}$  канальной трубы штатной термообработки с 35 до 8,7 МПа в интервале 700—800 °С и атермического участка 800—1100 °С, на котором предел текучести 8,7—6,7 МПа почти не зависит от температуры, а также с учетом резкого роста относительного удлинения до 250% в диапазоне 700—800 °С.

Охлаждение реактора восстанавливается включением одного или двух насосов аварийного охлаждения расходом 250 т/ч каждый или включением передвижной насосной установки расходом 150 т/ч, подающих воду в обе части реактора с предварительным открытием паросбросных устройств, пропускная способность которых варьировалась от одного до четырех клапанов БРУ-К. Номинальная производительность каждого из них составляет 735 т/ч. Пар сбрасывался в конденсаторы турбин с последующим выбросом в атмосферу. Параметры исходного состояния элементов активной зоны для канала средней мощности на время восстановления охлаждения реактора приведены в таблице.

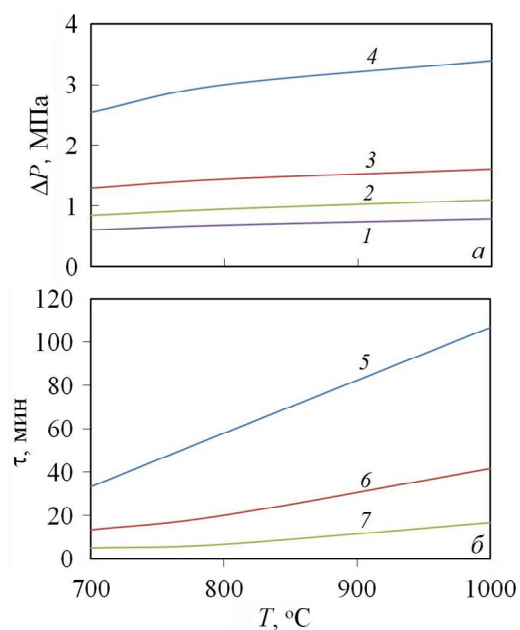
Всплеск давления в барабанах-сепараторах в зависимости от температуры графитовых блоков показан на рис. 3. Влияние остаточной мощности, отводимой от топлива, на всплеск давления незначительно. Влияние числа открытых перед восстановлением охлаждения клапанов БРУ-К на всплеск давления в барабанах-сепараторах и продолжительность всплеска при разном расходе захлаживания для теплового состояния активной зоны в диапазоне 700—1000 °С показаны на рис. 4.

Параметры исходного состояния элементов активной зоны на время восстановления охлаждения

Время после полного обесточивания, ч:мин	Мощность остаточного энерговыделения в активной зоне, МВт	Максимальная температура, °С		
		графитовых блоков	канальной трубы	оболочек твэлов
9:40	20,7	700	720	760
12:00	19,2	800	820	860
16:30	17,7	1000	1015	1040

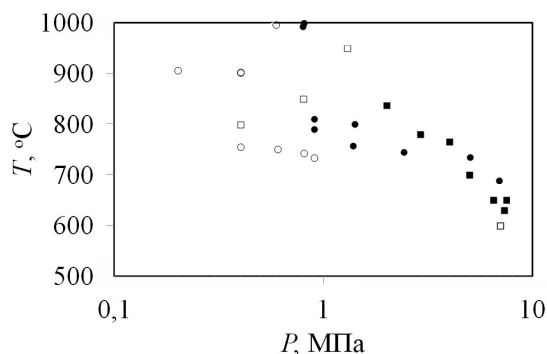


Р и с. 3. Всплеск давления в барабанах-сепараторах в зависимости от расхода воды через активную зону при одном (а), четырех открытых клапанах БРУ-К (б) и температуре графитовых блоков 700 (1), 800 (2), 1000 °С (3)



Р и с. 4. Всплеск давления в барабанах-сепараторах в зависимости от температуры графитовых блоков канала средней мощности для расхода воды 250 т/ч при одном (1), двух (2), трех (3), четырех открытых клапанах БРУ-К (4) (а) и продолжительность всплеска (б) с начала роста давления до снижения температуры канальной трубы до 600 °С при расходе воды 150 (5), 250 (6), 500 т/ч (7)

Оцененные деформационные нагрузки технологического канала по продолжительности воздействия и импульса давления в диапазоне 0,2—5 МПа и температуре канальной трубы 700—1000 °С были реализованы в эксперимен-



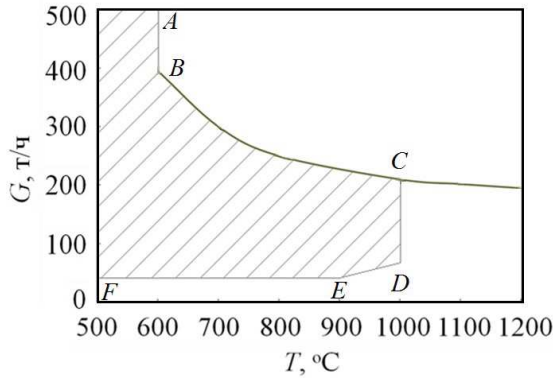
Р и с. 5. Параметры сохранения целостности канальной трубы с разрезанными графитовыми блоками без разгерметизации (○) и с разгерметизацией (●), с целыми графитовыми блоками без разгерметизации (□) и с разгерметизацией (■)

тах, проведенных со штатной ячейкой технологического канала [3]. В экспериментах использовали целые графитовые блоки и блоки, разрезанные по центру граней четырьмя продольными сквозными резами. Полученная критериальная граница образования свищей (целостности канальной трубы) в этом диапазоне параметров в координатах давление—температура показана на рис. 5.

Эксперименты показали, что в диапазоне 700—1000 °С при импульсе давления до 0,6 МПа целостность канальной трубы сохраняется, хотя графитовые блоки заклинивают на трубе. Подобные импульсы давления появляются после декомпрессии контура циркуляции до 0,1 МПа и восстановления охлаждения активной зоны расходом воды 150 или 250 т/ч при открытых трех или четырех клапанах БРУ-К.

Таким образом, целостность канальных труб при захлаживании сохраняется при параметрах расхода и температуры, показанных на рис. 6 заштрихованной областью. Граница *AB* указывает на отсутствие ограничения расхода захлаживании при температуре канальной трубы (графитовой кладки) 600 °С и ниже, граница *BC* соответствует сохранению целостности труб при температуре меньше 1000 °С, граница *CDE* — ограничению перегрева твэлов (канальной трубы) 1000 °С.

Импульсы давления в диапазоне 0,7—5 МПа и при температуре выше 700 °С приводят к деформированию канальной трубы и образованию свищей площадью до 40 мм<sup>2</sup>. Как правило, свищи образуются в области концентраторов



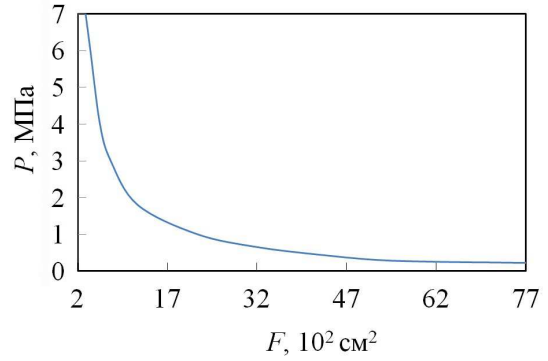
Р и с. 6. Область целостности канальных труб в зависимости от расхода захлаживания и температуры канальных труб (графитовой кладки) при четырех открытых клапанах БРУ-К

напряжения на разрезах и изломах колец твердого контакта (рис. 7).

Потеря конструктивной целостности реактора в режиме разогрева осушенной активной зоны и последующего ее захлаживания зависит от возможной переопрессовки реакторного пространства, обусловленной дисбалансом между истекающим в него теплоносителем в случае множественного разрыва технологических каналов в виде свищей и сбросом теплоносителя через систему защиты. Система защиты реакторного пространства включает в себя верхние и нижние трубопроводы сброса парогазовой смеси, гидрозатворы в выгородке бассейна-барботера (избыточное давление выброса гидрозатворов 19,5 кПа), систему локализации аварии (для энергоблоков Смоленской и второй очереди Курской АЭС) и мембранные предохранительные устройства с выбросом парогазовой смеси в атмосферу (избыточное давление открытия мембранного предохранительного устройства



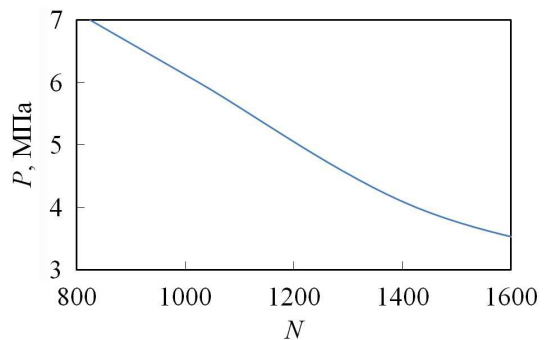
Р и с. 7. Типичный свищ



Р и с. 8. Зависимость давления в контуре циркуляции от интегральной площади критического сечения истечения

0,18 МПа). Целостность реакторного пространства консервативно оценивается повышением давления в нем до 0,214 МПа. Расход перегретого до 800 °С пара из контура циркуляции в реакторное пространство, при котором в нем достигается такое давление, составляет ~250 кг/с (900 т/ч) [4]. Как видно на рис. 8, при условии критического истечения в зоне свища технологического канала площадью 40 мм<sup>2</sup> и их образовании в 1600 каналах (интегральная площадь разрыва 640 см<sup>2</sup>) давление в контуре циркуляции должно достигать ~3,5 МПа и больше. При меньшем давлении в случае гипотетического одновременного разрыва всех каналов активной зоны в виде свищей площадью 40 мм<sup>2</sup> принятое давление потери конструктивной целостности реакторного пространства 0,214 МПа не достигается (рис. 9).

Очевидно, что условие достижения температурных критериев образования свищей одновременно во всех технологических каналах достаточно консервативно, хотя в области давления в контуре циркуляции больше 1 МПа диапазон температуры образования свищей небольшой — 750—800 °С (см. рис. 5).



Р и с. 9. Давление в контуре циркуляции и число каналов со свищами площадью 40 мм<sup>2</sup> при достижении в реакторном пространстве избыточного давления 0,214 МПа

С учетом рассмотренных возможностей потери физических барьеров безопасности развитие аварии при полном длительном обесточивании энергоблока с декомпрессией контура циркуляции через 1—1,5 ч после исходного события до ~0,1 МПа, множественных отказах оборудования, последующем разогреве обезвоженной активной зоны и расхолаживании может приводить к следующим последствиям:

при восстановлении охлаждения активной зоны с температурой графитовой кладки менее 550 °С расходом воды не более 250 т/ч при четырех открытых клапанах БРУ-К всплеск давления в контуре циркуляции составляет менее 0,6 МПа, свищи в канальных трубах не образуются, выброса в окружающую среду газообразных продуктов деления нет или он происходит через клапаны БРУ-К, если на время восстановления охлаждения температура графитовой кладки выше 550 °С;

при восстановлении охлаждения активной зоны с температурой графитовой кладки выше 550 °С расходом воды не более 250 т/ч при одном открытом клапане БРУ-К в контуре циркуляции всплеск давления возможен в диапазоне 2,5—3,4 МПа, в канальных трубах образуются свищи, целостность реакторного пространства сохраняется, газообразные продукты выбрасываются прежде всего в окружающую среду через клапаны БРУ-К и мембранное предохранительное устройство в случае превышения давления в реакторном пространстве 0,18 МПа.

Характерная особенность этих сценариев с декомпрессией контура циркуляции до 0,1 МПа состоит в том, что при захолаживании активной зоны оболочки твэлов теряют целостность ранее потери целостности канальных труб и газообразные продукты деления из-под оболочек твэлов все или почти все выбрасываются в окружающую среду через клапаны БРУ-К, минуя систему локализации.

Для уменьшения выбросов газообразных продуктов деления в окружающую среду для экспериментально обоснованных критериев потери целостности оболочек твэлов (до 850 °С) в условиях уменьшения перепада давления на оболочке до 1 МПа и соответственно образования свищей в канальной трубе при температуре

менее 800 °С импульсы давления в контуре циркуляции при захолаживании активной зоны должны быть больше 0,9 МПа (см. рис. 5) [5]. При этом для частичного перенаправления выброса через систему локализации давление в реакторном пространстве после образования свищей в канальной трубе не должно превышать давление открытия мембранного предохранительного устройства 0,18 МПа. Возможные сценарии реализации этих условий и их эффективность, например, повышение уровня начальной декомпрессии контура циркуляции до 1 МПа или начальная декомпрессия до 0,1 МПа с последующим повышением давления в контуре циркуляции закрытием клапанов БРУ-К перед захолаживанием требуют всестороннего детального обоснования.

Таким образом, эффективность управления запроектной аварией с полным обесточиванием энергоблоков РБМК обеспечивается действиями оператора, выбор которых должен осуществляться, исходя из минимизации радиационных последствий аварии с учетом состава работоспособного оборудования, наличия средств контроля и управления параметрами развивающегося аварийного процесса, а также времени для выполнения этих действий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бубнова Т.А., Жуков И.В., Никитин Ю.М. и др. Управление запроектной аварией РБМК с полным обесточиванием в условиях длительного обезвоживания активной зоны. — Атомная энергия, 2017, т. 123, вып. 6, с. 307—311.
2. Программа RELAP5/mod 3.2. Code Manual. NUREG/CR-5535. INEL-95/0174, 1995.
3. Бубнова Т.А., Лемехов Ю.В., Никитин Ю.М. и др. Экспериментальное исследование критерия приемлемости (целостности) и характера разрушения канальных труб РБМК. — В сб.: Годовой отчет НИКИЭТ, 2019, с. 172—175.
4. Василевский В.П., Никитин Ю.М., Михайлов Д.А. О характере повреждения канальных труб и захолаживания обезвоженной активной зоны РБМК-1000 в период длительного перегрева при запроектных авариях. — Там же, 2015, с. 132—135.
5. Абрамов М.А., Авдеев В.И., Адамов Е.О. и др. Канальный ядерный энергетический реактор РБМК. Под общ. ред. Ю.М. Черкашова. М., НИКИЭТ, 2006. 632 с.