

А. Г. Крушинский, С. В. Лысенко,  
В. П. Мукоид, С. В. Чернобай

ОП «Бюро аналитических исследований безопасности  
АЭС» ГНТЦ ЯРБ

## Исследование влияния на риск тяжелой аварии на РУ ВВЭР-1000/320 действий оперативного персонала при малых течах первого контура

*Изложены результаты анализа противоаварийных действий оперативного персонала энергоблока с реакторной установкой ВВЭР-1000/320 при возникновении малых течей первого контура (12 – 50 мм) внутри гермообъема, некомпенсируемых подсистемой нормальной подпитки ТК, и изначально работоспособных системах безопасности.*

А. Г. Крушинський, С. В. Лисенко, В. П. Мукоїд, С. В. Чернобай

**Дослідження впливу на ризик тяжкої аварії на РУ  
ВВЕР-1000/320 дій оперативного персоналу при ма-  
лих течах першого контуру**

*Викладено результати аналізу протиаварійних дій опера-  
тивного персоналу енергоблока атомної електростанції з  
реакторною установкою ВВЕР-1000/320 при виникненні ма-  
лих теч першого контуру (12 – 50 мм) всередині гермооб'є-  
му, некомпенсованих підсистемою нормального підживлен-  
ня ТК, та початково працездатних системах безпеки.*

Действия оперативного персонала играют важную роль в обеспечении безопасности при эксплуатации атомных электростанций. В соответствии с [1], подбор персонала АЭС и обеспечение необходимого уровня его квалификации (как для условий нормальной эксплуатации, так и при нарушениях нормальной эксплуатации, аварийных ситуациях и авариях) являются одним из принципов глубоководной защиты.

Результаты анализов безопасности для зарубежных АЭС (Калининская АЭС, Балаковская АЭС, АЭС Дуковани, АЭС Пакш и др. [2, 3]), а также результаты, вошедшие в отчеты по анализу безопасности (ОАБ) энергоблоков АЭС Украины, показывают, что ошибочные или несвоевременные действия персонала при управлении аварийными процессами вносят от 25 до 50 % вклада в уровень безопасности энергоблока, выраженной в частоте повреждения активной зоны (ЧПАЗ).

По результатам анализов безопасности, выполненных в рамках разработки ОАБ АЭС Украины [4, 5], можно назвать следующие факторы, определяющие высокий уровень зависимости риска от действий персонала:

несовершенство и недостаточный уровень детализации противоаварийных инструкций и процедур, противоречия в них, недостаточный уровень обоснованности расчетными и экспериментальными данными;

недостаток знаний об аварийных процессах в реакторной установке (РУ), ограниченное количество результатов расчетно-аналитических исследований в этой области;

не всегда оптимальное и эффективное использование технических возможностей, имеющихся в проекте для управления аварийными процессами.

Недостатки существующих противоаварийных инструкций неоднократно отмечались как украинскими экспертами [6, 10], так и экспертами ряда зарубежных организаций [7, 8, 9].

В этой связи проведение систематического и детального анализа аварийных сценариев, направленного на совершенствование станционных противоаварийных документов и повышение противоаварийной готовности персонала, позволяет существенно снизить риск возникновения тяжелых аварий при эксплуатации АЭС.

В настоящей работе на основании результатов выполненных термогидравлических расчетов установлены характерные особенности протекания аварий вследствие возникновения малых некомпенсируемых течей из первого контура. К малым некомпенсируемым течам первого контура относятся течи, которые не могут быть компенсированы работой подсистемы подпитки первого контура и приводят к срабатыванию системы безопасности (СБ) — аварийной защиты (АЗ) и защит САОЗ (системы аварийного охлаждения зоны). Данный поддиапазон характеризуется тем, что вынос энергии в течь меньше энергии остаточных энерговыделений активной зоны реактора. При этом для компенсации потерь теплоносителя в течь требуется подпитка первого контура с помощью САОЗ высокого давления (ВД); для предотвращения роста температуры и давления в первом контуре необходим теплоотвод через второй контур, а для перевода энергоблока в конечное безопасное состояние «холодный останов» (при давлении первого контура, близком к атмосферному, для минимизации потерь теплоносителя и создания условий для устранения причины аварии) требуются действия персонала по организации расхолаживания первого контура. При переводе РУ в безопасное конечное состояние нужно обеспечить выполнение всех

критических функций безопасности и соблюдение критериев приемлемости.

Можно отметить следующие характерные для данной аварии и увеличивающие риск особенности аварийного процесса, которые определяются истечением теплоносителя первого контура в помещения системы герметичных ограждений (СГО) энергоблока:

интенсивный выход продуктов деления за границы первого контура из-за нарушения целостности одного из барьеров глубоководной защиты;

увеличенная нагрузка на строительные конструкции и оборудование в пределах СГО, создающая потенциальную угрозу целостности последнего из барьеров глубоководной защиты;

необходимость компенсации потерь теплоносителя в течь при высоких и средних параметрах первого контура, т. е. необходимость подпитки первого контура от САОЗ высокого давления. Это, в свою очередь, обуславливает возможность зависящего отказа каналов САОЗ вследствие засорения фильтров теплообменника САОЗ по причине разрушения теплоизоляции оборудования главного циркуляционного контура (ГЦК);

потенциальная опасность роста разрыва и увеличения расхода в течь.

Угроза от каждого из указанных выше факторов сохраняется до тех пор, пока реактор находится под высоким давлением, т. е. пока не будет достигнуто безопасное конечное состояние. При этом риски тем выше, чем больше времени будет затрачено на снижение параметров РУ. Таким образом, для снижения указанных опасностей, в том числе для предотвращения повреждения активной зоны при высоком давлении, главной задачей является скорейшее снижение параметров первого контура и перевод РУ в стабильное безопасное состояние при низких параметрах.

Существуют следующие дополнительные факторы, негативно влияющие на надежность выполнения критических функций безопасности, которые необходимо учитывать при анализе с течами первого контура в пределах гермооболочки (ГО):

увеличение количества «загрязненной» воды, перекачиваемой системами САОЗ высокого и низкого давления и спринклерной системой через приямок за период между возникновением исходного события аварии (ИСА) и достижением безопасного конечного состояния, повышает вероятность засорения приемного устройства ГО и, как следствие, повышает вероятность критического отказа САОЗ;

возникновение условий «холодной переопрессовки» в ходе развития аварийного процесса повышает вероятность разрушения корпуса реактора;

наложение событий, которые приводят к остановке или задержке процесса расхолаживания РУ, снижает резервирование систем, выполняющих функции безопасности, требует дополнительных действий оперативного персонала для перевода РУ в безопасное конечное состояние, увеличивает риск тяжелой аварии.

Результаты данной работы содержат анализ ключевых действий оперативного персонала, предписанных противоаварийными процедурами по управлению рассматриваемым аварийным процессом. Указанные процедуры изложены в инструкциях по ликвидации аварий и аварийных ситуаций (ИЛА) и руководствах по управлению запроектными авариями (РЗПА).

Анализ выполнен с использованием детерминистического подхода к моделированию теплогидравлических про-

цессов в РУ в ходе аварии. Для расчетов использована теплогидравлическая модель реакторной установки с реактором ВВЭР-1000/В320, разработанная на базе расчетной программы RELAP5/MOD3.2 [15]. Модель включает все основное оборудование первого и второго контуров, относящееся к нормальной эксплуатации РУ, а также системы безопасности. В модели реализованы логика функционирования оборудования и систем согласно проектным алгоритмам и возможность моделирования управляющих действий персонала.

Цель выполненных теплогидравлических анализов — определение характерных особенностей данного аварийного процесса, анализ ключевых действий оперативного персонала и выявление недостатков в существующих противоаварийных процедурах, повышающих риск тяжелой аварии.

В рамках работы исследованы аварийные сценарии для малых некомпенсируемых течей первого контура в пределах СГО с изначально работоспособными системами безопасности. Рассмотрены четыре группы сценариев:

без вмешательства оперативного персонала;

с действиями оперативного персонала согласно ИЛА;

с отказом 2/3 САОЗ ВД и действиями оперативного персонала согласно ИЛА и РЗПА;

с оптимизированными действиями оперативного персонала.

Перечень выполненных расчетных сценариев представлен в табл. 1 с указанием эквивалентного диаметра течи и граничных условий расчета, включающих конфигурацию САОЗ ВД (количество работоспособных каналов из трех имеющихся) и действия по управлению аварией, в том числе восстановление работы продувки-подпитки первого контура системы (ТК) после локализации СГО.

Возникновение малой некомпенсируемой течи характеризуется снижением давления в первом контуре и уровня в КД до пределов, при которых формируется сигнал аварийной защиты реактора (АЗ).

После срабатывания АЗ и отключения турбины давление во втором контуре стабилизируется в диапазоне работы быстродействующего редуцирующего устройства со сбросом пара в конденсатор турбины (БРУ-К) или в атмосферу (БРУ-А). Подпитка парогенератора (ПГ) обеспечивается вспомогательными питательными электронасосами (ВПЭН), которые включаются автоматически по снижению уровня в любом ПГ либо при отключении турбопитательного электронасоса (ТПН).

Уменьшение запаса до насыщения теплоносителя в горячей нитке любой циркуляционной петли главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) менее 10 °С или увеличение давления в помещениях защитной оболочки свыше 1,3 кгс/см<sup>2</sup> (абс.) приводит к закрытию системы локализующей арматуры (СЛА) СБ и, как следствие, формированию сигнала защит САОЗ, прекращению подпитки первого контура от системы ТК и отключению главных циркуляционных насосов (ГЦН). После окончания выбега ГЦН теплоотвод от активной зоны реактора осуществляется за счет естественной циркуляции теплоносителя первого контура.

В период начального спада давления, обусловленного разгерметизацией и срабатыванием АЗ, давление в реакторе снижается до уровня, близкого к давлению во втором контуре. В результате формирования сигнала защит САОЗ происходит автоматическое включение механизмов систем безопасности. При снижении давления в первом контуре до 110 кгс/см<sup>2</sup> начинается подача борного концентрата насо-

Таблица 1. Перечень расчетных сценариев

№ п/п	Диаметр течи, мм	Граничные условия				Примечание
		САОЗ ВД	Управление аварийным процессом	Восстановление работы системы ТК после локализации СГО	Расхолаживание компенсатора давления (КД)	
1	45	3/3	Без вмешательства персонала	Нет	Нет	Стабилизация параметров РУ действием автоматики
2	22	3/3	Без вмешательства персонала	Нет	Нет	Стабилизация параметров РУ действием автоматики
3	12	3/3	Без вмешательства персонала	Нет	Нет	Стабилизация параметров РУ действием автоматики
4	45	3/3	Согласно ИЛА	Есть	Впрыск от системы ТК	Недостаточная скорость расхолаживания второго контура
5	22	3/3	Согласно ИЛА	Есть	Впрыск от системы ТК	Закрытие БЗОК и отсечение подпитки ПП
6	12	3/3	Согласно ИЛА	Есть	Впрыск от системы ТК	Закрытие БЗОК и отсечение подпитки ПП
7	45	3/3	Согласно ИЛА	Нет	Открытие сдвухки из КД (УР24)	Уровень в КД 8 м не достигается. Недостаточная скорость расхолаживания второго контура
8	22	3/3	Согласно ИЛА	Нет	Открытие сдвухки из КД (УР24)	Закрытие БЗОК и отсечение подпитки ПП
9	12	3/3	Согласно ИЛА	Нет	Впрыск от ТК, открытие УР24	Закрытие БЗОК и отсечение подпитки ПП
10	45	3/3	Согласно ИЛА	Нет	Открытие САГ	Неконтролируемое снижение уровня в реакторе
11	45	3/3	Оптимизированная стратегия	Есть	Впрыск от системы ТК	Ускоренное достижение условий подключения ЛПП с уменьшением выноса теплоносителя в течь
12	45	3/3	Оптимизированная стратегия	Нет	Открытие сдвухки из КД (УР24)	Ускоренное достижение условий подключения ЛПП с уменьшением выноса теплоносителя в течь
13	30	3/3	Без вмешательства персонала	Нет	Нет	Стабилизация параметров РУ действием автоматики
14	30	3/3	Управление расходом САОЗ ВД	Нет	Нет	Неконтролируемое снижение уровня в реакторе
15	12	1/3	Согласно ИЛА и РЗПА	Есть	Впрыск от системы ТК	Возникновение условий «холодной переопрессовки»
16	12	1/3	Согласно ИЛА и РЗПА	Есть	Впрыск от системы ТК	Возникновение условий «холодной переопрессовки»
17	12	1/3	Без вмешательства персонала	Нет	Нет	Стабилизация параметров РУ действием автоматики

сами САОЗ ВД, что обеспечивает подпитку первого контура и замедляет темп снижения давления. Дальнейшее поведение давления в первом контуре определяется расходными характеристиками насосов САОЗ ВД в зависимости от эквивалентного диаметра течи. При относительно малых эквивалентных диаметрах течи давление первого контура стабилизируется на уровне около 100 — 110 кгс/см<sup>2</sup>.

При эквивалентном диаметре течи, близком к верхнему пределу диапазона малых течей, например 45 мм, снижение давления носит плавный характер, достигает уровня ниже давления гидроемкостей (ГЕ) САОЗ, но выше уровня работы САОЗ НД. Давление первого контура стабилизируется на уровне, при котором суммарный расход САОЗ сравнивается с расходом теплоносителя в течь. При этом продолжается снижение температуры первого контура и, тем самым, создаются условия для «холодной переопрессовки» и повреждения корпуса реактора.

При стабилизации давления первого контура происходит относительная стабилизация состояния РУ (в зависимости от эквивалентного диаметра течи) либо с частичным отводом тепла через второй контур, либо с падением температуры первого контура ниже второго, что приводит к отводу тепла второго контура к теплоносителю первого и выбросу дополнительного количества энергии через течь в СГО.

Особенностями течей из парового объема КД является то, что в начальный период переходного процесса (до срабатывания защиты САОЗ и начала работы САОЗ ВД на контур) массовый расход теплоносителя в течь относительно небольшой по сравнению с течами из ГЦТ вследствие истечения в разрыв в основном паровой фазы. После заполнения КД насосами САОЗ ВД массовый расход теплоносителя в течь возрастает почти в пять раз. При этом в ходе развития аварийного процесса не происходит опорожнения КД (в отличие от аварийного процесса с течью из

петель ГЦТ), что вызывает затруднения как при идентификации ИСА, так и при управлении аварией.

Согласно ИЛА, персонал может идентифицировать возникновение ИСА «Малая течь 1 контура» в пределах ГО по следующим основным признакам:

резкое снижение давления первого контура и уровня в КД; включение всех групп трубчатых электронагревателей (ТЭН) КД и последующее отключение по снижению уровня в КД до 4,2 м;

включение резервного насоса подпитки первого контура, обработка на «больше» клапанов регулятора подпитки (до полного открытия);

срабатывание АЗ по сигналу «Давление над активной зоной менее 148 кгс/см<sup>2</sup> при мощности реактора более 75 % и температуре первого контура более 260 °С»;

запуск механизмов каналов систем безопасности по сигналам: « $\Delta T_s \leq 10$  °С», «Давление под оболочкой более 0,3 кгс/см<sup>2</sup>» и срабатывание сигнализации «Ступенчатый пуск»;

локализация ГО посредством закрытия локализирующей арматуры;

повышение температуры и давления в ГО, срабатывание табло сигнализации «Давление под оболочкой больше 0,3 кгс/см<sup>2</sup>»;

отключение всех ГЦН после закрытия пневмоарматуры; повышение активности в гермооболочке.

Такие признаки являются общими для ИСА с течью внутри ГО; в дальнейшем оперативный персонал должен выбрать соответствующую противоаварийную процедуру (соответствующий раздел) из ИЛА в зависимости от размера течи.

Анализ приведенной в ИЛА информации в части отличительных признаков аварии позволяет сделать следующие выводы:

характеристики отличительных признаков не являются исчерпывающими и в полной мере адекватными; не учитывается тот факт, что, несмотря на компенсируемость расхода в течь средствами нормальной подпитки на начальном этапе, рост параметров в ГО может привести к локализации ГО и, как следствие, прекращению подачи теплоносителя от системы ТК, в результате чего течь становится некомпенсируемой;

большинство признаков одинаковы для всего диапазона течей, отсутствуют индивидуальные признаки. Указание на течь расходом 200 т/ч или эквивалентным диаметром менее 30 мм является, с одной стороны, неточным, поскольку течь может быть компенсирована даже при большем расходе (см. табл. 1, сценарий № 1), и, с другой стороны, персонал на практике не может использовать указанный признак из-за отсутствия технических средств для определения диаметра течи и расхода;

указанный отличительный признак по величине расхода в течь без опорожнения КД не подтверждается расчетными анализами даже для течей Ду 12 мм и Ду 22 мм (табл. 1, сценарии №№ 2, 3);

использование отличительного признака «...Сработка всех четырех гидроемкостей пассивной части САОЗ» неэффективно, так как при малых течах диаметром более 30 мм давление первого контура сохраняется высоким и препятствует срабатыванию гидроемкостей (ГЕ) довольно долго — более 25 мин (табл. 1, сценарий № 1).

Учитывая вышесказанное, очевидно, что в условиях возникновения некомпенсируемых системой ТК течей оперативному персоналу затруднительно определить размер течи, а следовательно, понять, требования каких разделов

ИЛА необходимо применять для управления аварийным процессом.

С учетом предписаний ИЛА определены следующие основные стадии развития аварийного процесса и соответствующие им ключевые действия оперативного персонала: идентификация ИСА и выбор противоаварийных процедур;

поддержание запаса теплоносителя первого контура и создание стояночной концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура;

организация расхолаживания РУ через второй контур; отвод остаточных тепловыделений и поддержание стабильного безопасного состояния.

В рамках данного анализа выполнен ряд термогидравлических расчетов, моделирующих стратегию управления аварийным процессом согласно требованиям ИЛА. При моделировании было принято допущение о том, что оперативный персонал начнет противоаварийные мероприятия через 5 мин после срабатывания АЗ или через 15 мин после начала аварийного процесса. Данное допущение является консервативным и основано на том, что, согласно [13], в течение первых 5 — 15 мин аварии оперативный персонал находится в условиях стресса. По истечении этого времени повышается вероятность корректного распознавания ИСА и принятия правильного решения по управлению аварийным процессом.

Для течей Ду 45 и 22 мм вмешательство оператора моделируется через 5 мин после АЗ. Для течи Ду 12 мм автоматическое срабатывание АЗ происходит через 42,5 мин (согласно расчетному сценарию № 3, табл. 1). Поэтому для сценариев с течью Ду 12 мм принято, что оператор включает АЗ через 15 мин после начала течи. Дальнейшие действия оператора для сценариев с течью Ду 12 мм моделируются через 2 мин после АЗ. Для сравнения эффективности различных мероприятий при различных диаметрах течи моделируется один и тот же набор действий оперативного персонала. Действия выполняются с интервалом в 2 мин (с учетом достижения требуемых условий) в следующей последовательности:

включение трех насосов САОЗ ВД TQ14;

открытие арматуры системы аварийного газоудаления (САГ), объединения воздушники реактора и ПГ с паровым объемом КД, а также с линией сдувок в теплообменник организованных протечек (ТОП YR61);

заполнение ПГ от ВПЭН до уровня 3,7 м с дистанционным управлением пуско-остановочными регуляторами (РППО);

после снятия сигнала  $\Delta T_{s1K} \leq 10$  °С оператор открывает локализирующую арматуру на линии продувки-подпитки и организует подачу борированной воды двумя подпиточными насосами из бака ТВ10;

после достижения стояночной концентрации борной кислоты оператор включает расхолаживание через одну БРУ-К со скоростью 15 °С/ч;

одновременно с началом расхолаживания через второй контур моделируется расхолаживание КД путем переключения подпитки первого контура с подачи в петли ГЦТ на подачу в КД по линии впрыска;

в случае превышения уровня в КД более 4,2 м (после снятия запрета на включение ТЭН КД) оператор включает все группы ТЭН КД;

после достижения уровня в КД 8 м оператор отключает два из трех насосов САОЗ ВД TQ13;

после начала работы САОЗ НД на контур оператор отключает все насосы САОЗ ВД (TQ13 и TQ14).

При анализах были рассмотрены варианты действий оперативного персонала по расхолаживанию КД, предусмотренные ИЛА. В сценариях №№ 4, 5, 6 (табл. 1) моделируется ввод в работу системы подпитки-продувки первого контура. В сценариях №№ 7, 8, 9, 10 (табл. 1) расхолаживание КД производится сдувкой парогазовой смеси из КД в барботер по линии УР24. В сценарии № 10 сброс пара из КД в барботажный бак (ББ) моделируется открытием арматуры САГ (УР).

Для сценария № 14 (табл. 1) с течью Ду 30 мм из парового пространства КД моделировались только действия оперативного персонала по управлению расходом САОЗ ВД:

отключение одного канала САОЗ ВД по достижении уровня в КД 8 м;

отключение второго канала САОЗ ВД и уменьшение расхода третьего канала до 20 % через 1000 с после начала течи.

Результаты расчетного анализа сценариев с действиями оперативного персонала согласно ИЛА при малых некомпенсируемых течах из первого контура показали неэффективность отдельных действий, предписанных ИЛА, а в некоторых случаях невозможность их выполнения.

Так, моделирование действий персонала по расхолаживанию РУ согласно рекомендациям ИЛА при малых некомпенсируемых течах первого контура в пределах гермообъема выявило следующие основные проблемы, влияющие на эффективность управления аварийным процессом:

задержку начала расхолаживания РУ, связанную с медленным вводом бора и требованием ИЛА создать стояночную концентрацию бора в первом контуре;

срабатывание технологических защит второго контура, приводящее к изоляции ПГ по пару и питательной воде;

неэффективность управления давлением первого контура и уровнем в КД согласно предписаниям ИЛА (для отдельных течей);

недостаточную скорость расхолаживания второго контура, что приводит к подогреву первого контура вторым (для отдельных течей).

Рассмотрим каждую из обозначенных проблем подробнее.

Согласно требованиям ИЛА, при анализируемой аварийной ситуации до начала расхолаживания оперативный персонал должен заполнить парогенераторы до максимального уровня 3,7 м и создать стояночную концентрацию бора в первом контуре. Подача борного концентрата в первый контур реализуется с помощью насосов САОЗ ВД ТQ14 и системы ТК. Это связано с выполнением целого комплекса действий по управлению соответствующим оборудованием. При этом вследствие локализации ГО затрудняется процесс проверки соблюдения условия по концентрации бора путем пробоотбора, из-за чего оперативный персонал должен контролировать количество вводимого борного концентрата по снижению уровня в баках запаса борного концентрата ТВ10 и выполнять расчет необходимого объема борного концентрата для ввода в первый контур с целью создания стояночной концентрации. Данное обстоятельство ведет к дополнительной потере времени, возникает возможность новых видов отказов оборудования и ошибочных действий персонала по управлению аварийным процессом.

Из результатов расчетных анализов следует, что при малых некомпенсируемых течах начальная подкритичность обеспечивается за счет срабатывания аварийной защиты реактора. Если начать расхолаживание РУ не дожидаясь создания стояночной концентрации бора, то в дальнейшем подкритичность обеспечивается подачей борированной воды от САОЗ ВД. При этом ввод положительной реактивности за счет снижения температуры теплоносителя первого кон-

тура существенно меньше, чем отрицательной за счет борирования от САОЗ ВД. Следовательно, создание стояночной концентрации до начала расхолаживания РУ является избыточным требованием, ведет к задержке перевода РУ в безопасное конечное состояние, а значит, повышает риск тяжелой аварии в случае дополнительных отказов.

Потеря времени персоналом на создание стояночной концентрации (табл. 2) особенно значительна при малых диаметрах течи (49 мин для течи Ду 12 мм). В этом случае локализация ГО не влияет на задержку времени для создания стояночной концентрации, поскольку происходит после начала расхолаживания по сигналу  $\Delta T_{s_{1K}} \leq 10^\circ\text{C}$ , формируемому вследствие впрыска в КД от системы ТК.

При увеличении диаметра течи, например при Ду 22 мм, локализация ГО по сигналу  $\Delta T_{s_{1K}} \leq 10^\circ\text{C}$  происходит до создания стояночной концентрации. Если персоналу в этом случае не удастся открыть локализирующую арматуру на линиях продувки-подпитки первого контура (после ее закрытия по сигналу  $\Delta T_{s_{1K}} \leq 10^\circ\text{C}$ ) и ввести систему продувки-подпитки в работу, задержка времени на создание стояночной концентрации увеличивается в полтора раза (с 25 до 37 мин, табл. 2). При диаметрах течей, близких к верхней границе диапазона (50 мм), действия персонала по вводу бора не требуются, поскольку и без них действием автоматики достигается стояночная концентрация бора. Так, для течи Ду 45 мм действия персонала по вводу бора согласно ИЛА лишь на несколько минут ускоряют достижение стояночной концентрации. В табл. 2 указаны временные интервалы основных событий аварийного процесса (локализация ГО, начало действий персонала по управлению аварией, начало действий персонала по созданию стояночной концентрации бора и время ее достижения), влияющие на задержку расхолаживания РУ в зависимости от диаметра течи и других особенностей расчетного сценария.

После создания стояночной концентрации бора в первом контуре оперативный персонал в соответствии с ИЛА начинает расхолаживание РУ через второй контур со скоростью  $15^\circ\text{C}/\text{ч}$ . Согласно ИЛА, это позволит снизить параметры первого контура до давления работы САОЗ НД на контур, что позволит обеспечить поддержание запаса теплоносителя в диапазоне низких давлений и отвод тепла от активной зоны.

Расчеты показывают, что расхолаживание в ряде случаев сопровождается срабатыванием защит САОЗ (давление в паропроводе менее  $50 \text{ кгс}/\text{см}^2$ , разность температур насыщения первого и второго контуров более  $75^\circ\text{C}$ , температура первого контура более  $200^\circ\text{C}$ ) и защит ПГ (давление в паропроводе менее  $45 \text{ кгс}/\text{см}^2$ , разность температур насыщения первого и второго контуров более  $75^\circ\text{C}$ , температура первого контура более  $200^\circ\text{C}$ ), предназначенных проектом для случаев разрывов трубопроводов второго контура, в результате которых (табл. 1, расчетные сценарии №№ 5, 6, 9):

закрываются быстродействующие запорно-отсечные клапаны (БЗОК) и теряется возможность использования БРУ-К; изолируются линии подачи питательной воды в ПГ и оперативный персонал должен повторно организовать подпитку ПГ.

Это приводит к уменьшению резервируемости по паросбросным устройствам второго контура, возникает также возможность новых видов отказов оборудования и ошибочных действий персонала по управлению аварийным процессом, вызванная «неуместным/нежелательным» срабатыванием вышеуказанных технологических защит, которые по сути прекращают расхолаживание через второй контур.

Таблица 2. Временные интервалы основных событий аварийного процесса

Течь, мм	Событие аварийного процесса	Расчеты аварий без вмешательства оперативного персонала (без расхолаживания КД)	Расчеты аварий с действиями персонала согласно ИЛА	
			Способ расхолаживания КД	
			впрыск от ТК	открытие УР24
45	Время локализации ГО, с	203	203	
22		1089	1373	
12		3757	6973	
45	Время начала действий персонала, с	-	343	
22		-	545	
12		-	900	
45	Время достижения стояночной концентрации бора, с	1200	1051	1132
22		4000	2083	2765
12		> 8000	3854	
45	Время от начала действий персонала до достижения стояночной концентрации бора, с	-	708	789
22		-	1538	2225
12		-	2954	

Причиной срабатывания указанных защит является то, что давление первого контура (а следовательно, и соответствующая ему температура насыщения) стабилизируется в зависимости от диаметра течи и количества работающих на первый контур каналов САОЗ ВД на достаточно высоком уровне (рис. 1). Давление и температура насыщения в ПГ (и температура теплоносителя в реакторе) снижаются пропорционально скорости расхолаживания (рис. 2), приводя к формированию условий для срабатывания защит.

Как показали расчетные исследования, при увеличении диаметра течи указанные условия для срабатывания защит не формируются. Например, для течи 45 мм при расхолаживании со скоростью 15 °С/ч температура в горячих нит-

ках опускается ниже 200 °С до того, как выполняются первых два условия (давление менее 50 кгс/см<sup>2</sup> и разность температур насыщения более 75 °С).

Во время расхолаживания РУ оперативный персонал в соответствии с ИЛА помимо организации расхолаживания через второй контур должен выполнять управление давлением первого контура путем:

отключения каналов САОЗ ВД либо прикрытия задвижек на напоре насосов с целью снижения расхода борированной воды в первый контур;

включения в работу теплоэлектронагревателей КД (ТЭН КД);

расхолаживания КД.

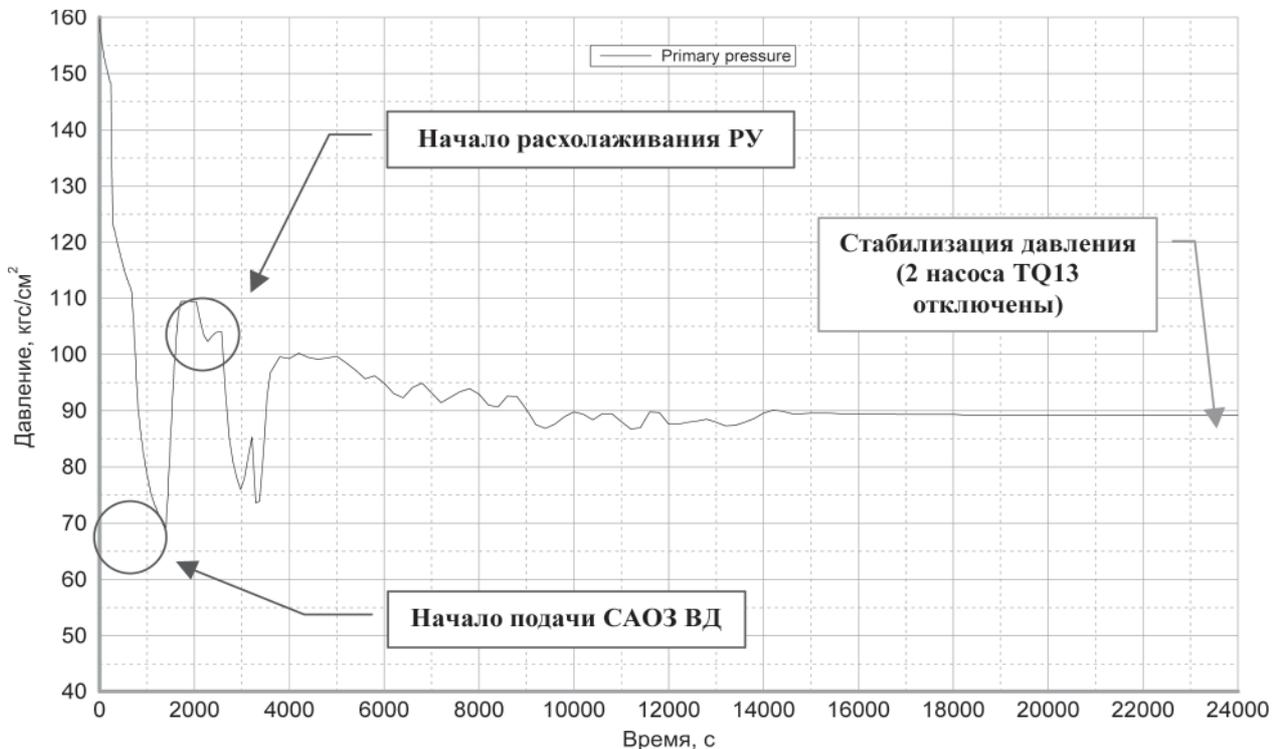


Рис. 1. Давление над активной зоной (течь Ду 22 мм, действия персонала согласно ИЛА, сценарий № 5)

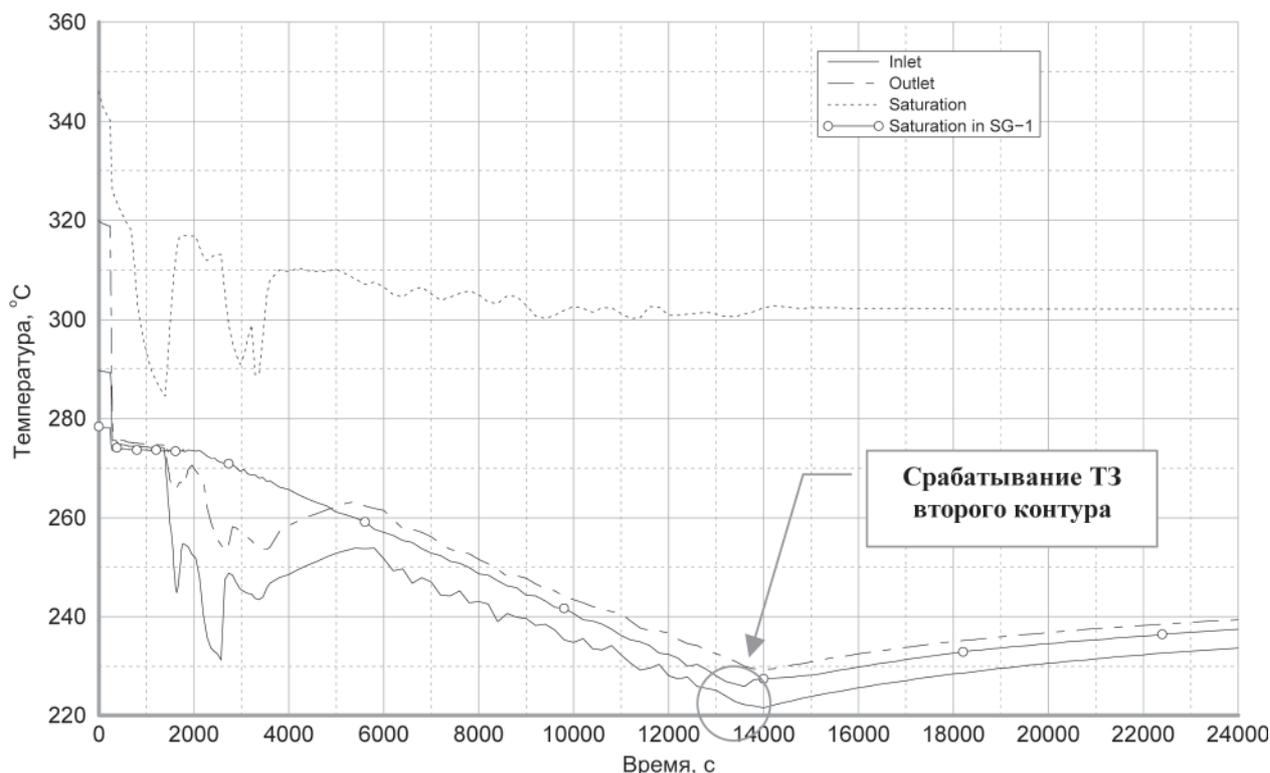


Рис. 2. Температура теплоносителя на входе и выходе из реактора и температура насыщения в реакторе и ПГ-1 (течь Ду 22 мм, действия персонала согласно ИЛА, сценарий № 5)

Расхолаживание КД может выполняться с помощью впрыска от системы ТК, а при закрытой локализирующей арматуре — открытием арматуры сдвухи из КД УР24 или арматуры САГ.

Как показали расчетные исследования, при наличии течи теплоносителя установившееся значение давления в первом контуре определяется диаметром течи и напорной характеристикой насосов САОЗ ВД. Указанная ситуация создает трудности при расхолаживании КД, поскольку любое снижение давления в первом контуре за счет расхолаживания КД приводит к увеличению расхода от насосов ТQ13, что, в свою очередь, вызывает рост уровня в КД и, как следствие, повышение давления в первом контуре до исходного значения.

При этом, как следует из расчетов, могут возникать дополнительные проблемы. Например, при течи Ду 12 мм (табл. 1, сценарии №№ 6, 9) расхолаживание КД постоянным впрыском от системы ТК обуславливает формирование сигнала САОЗ ( $\Delta T_{s_{1K}} \leq 10^\circ\text{C}$ ), что приводит к локализации ГО и связанным с этим трудностям по вводу системы продувки-подпитки в работу, а следовательно, задержке при создании стояночной концентрации бора в РУ.

В ИЛА предусмотрено включение ТЭН КД в начале расхолаживания РУ, однако отсутствуют указания по их дальнейшему управлению. Включенные ТЭН КД могут стать препятствием для выполнения других предписаний ИЛА: заполнения КД до требуемого уровня (8 м) и последующего отключения (снижения расхода) каналов САОЗ ВД. Выполненные расчеты показали, что при работе ТЭН и расхолаживании КД с помощью линии сдвухи УР24 уровень в КД при работе трех каналов САОЗ ВД не только не повышается, но снижается до уставки отключения ТЭН.

Расчетный анализ показал, что наибольшие неопределенности в части управления давлением первого контура и уровнем в КД согласно ИЛА имеют место в случае течи из парового пространства КД. Анализ течи из парового объема КД Ду 30 мм с действиями персонала по управлению уровнем в КД путем снижения расхода САОЗ ВД (отключение двух каналов САОЗ ВД при повышении уровня в КД до 8 м и снижение расхода третьего канала до 20 %) показал, что уровень в КД при этом остается равным около 11 м (рис. 3). Однако такие действия приводят к деградации функции подпитки первого контура и, как следствие, к уменьшению уровня в реакторе ниже патрубков горячих ниток (рис. 4). Отсюда следует, что при течи из парового пространства КД управление уровнем в КД путем отключения и уменьшения расхода каналов САОЗ ВД неэффективно, так как может приводить к образованию парового объема в реакторе и ухудшению условий охлаждения активной зоны реактора.

Аналогичные результаты получены для случая течи из ГЦТ при расхолаживании КД открытием арматуры САГ.

В рассмотренном сценарии после открытия линии САГ наблюдается резкое снижение давления первого контура и быстрое возрастание уровня в КД более 8 м (рис. 5). При этом отключение двух из трех насосов ТQ13 приводит к оголению активной зоны реактора со снижением уровня в реакторе до 4 м (рис. 6). При оголении активной зоны наблюдается высокий уровень в КД, что дезинформирует оператора в части оценки реально имеющегося запаса теплоносителя в первом контуре. Данное протекание аварии при возможных ошибках оператора или дополнительных отказах может привести к тяжелому повреждению активной зоны реактора.

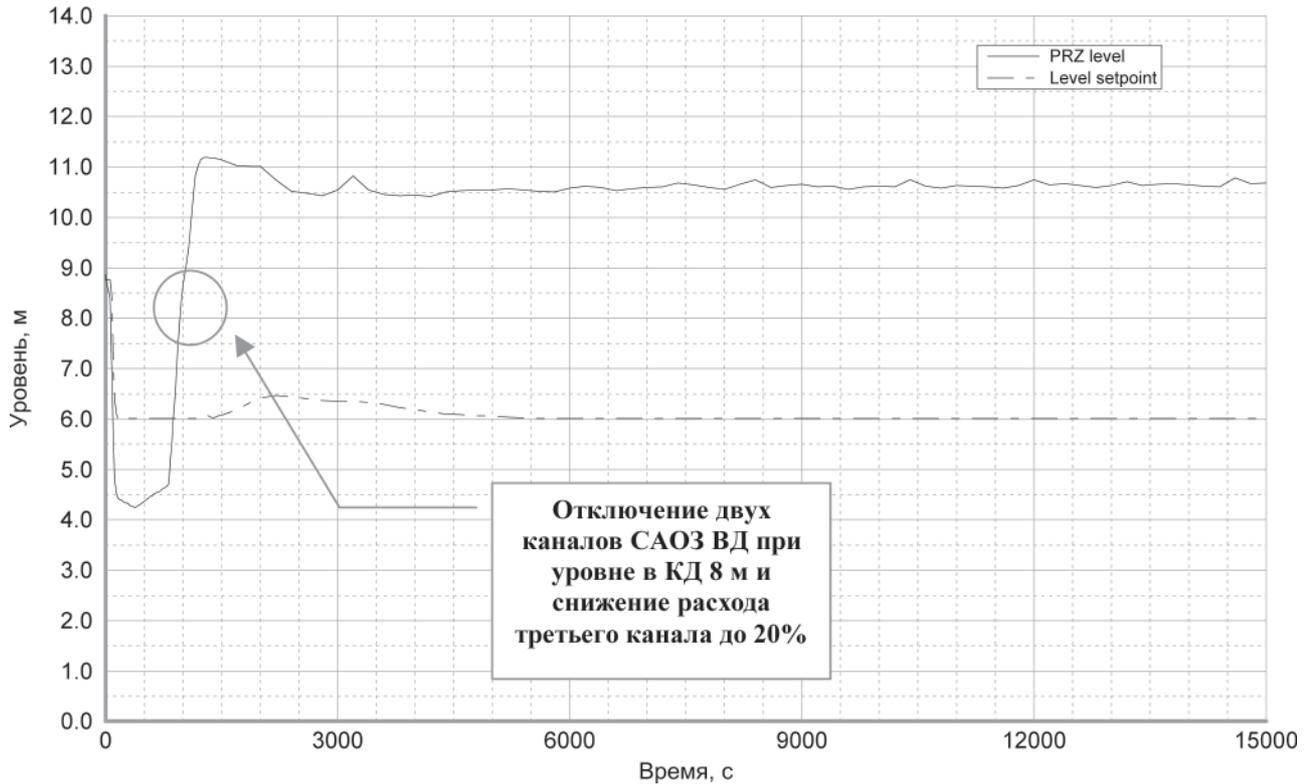


Рис. 3. Уровень в КД и значение уставки по уровню (течь из парового объема КД Ду 30 мм с управлением расходом САОЗ ВД, сценарий № 14)

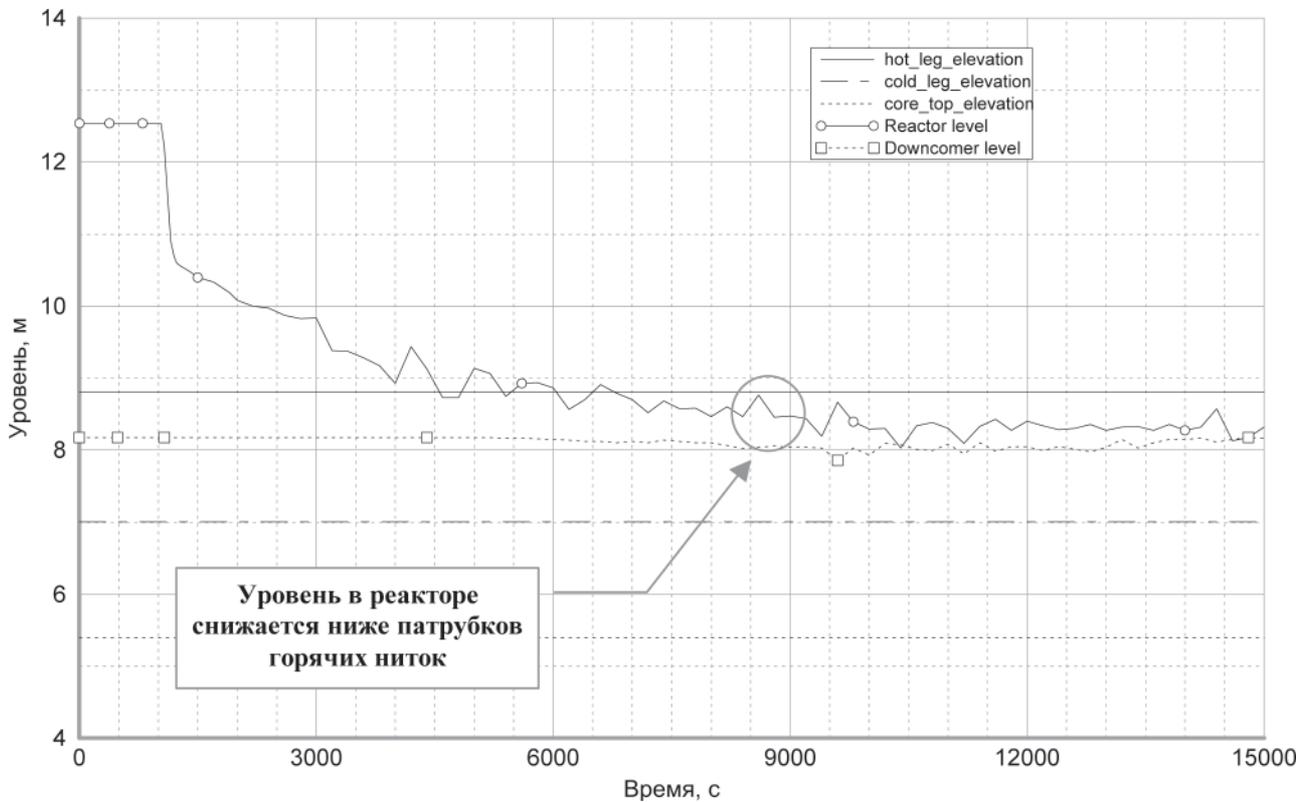


Рис. 4. Уровень в реакторе и опускном участке (течь из парового объема КД Ду 30 мм с управлением расходом САОЗ ВД, сценарий № 14)

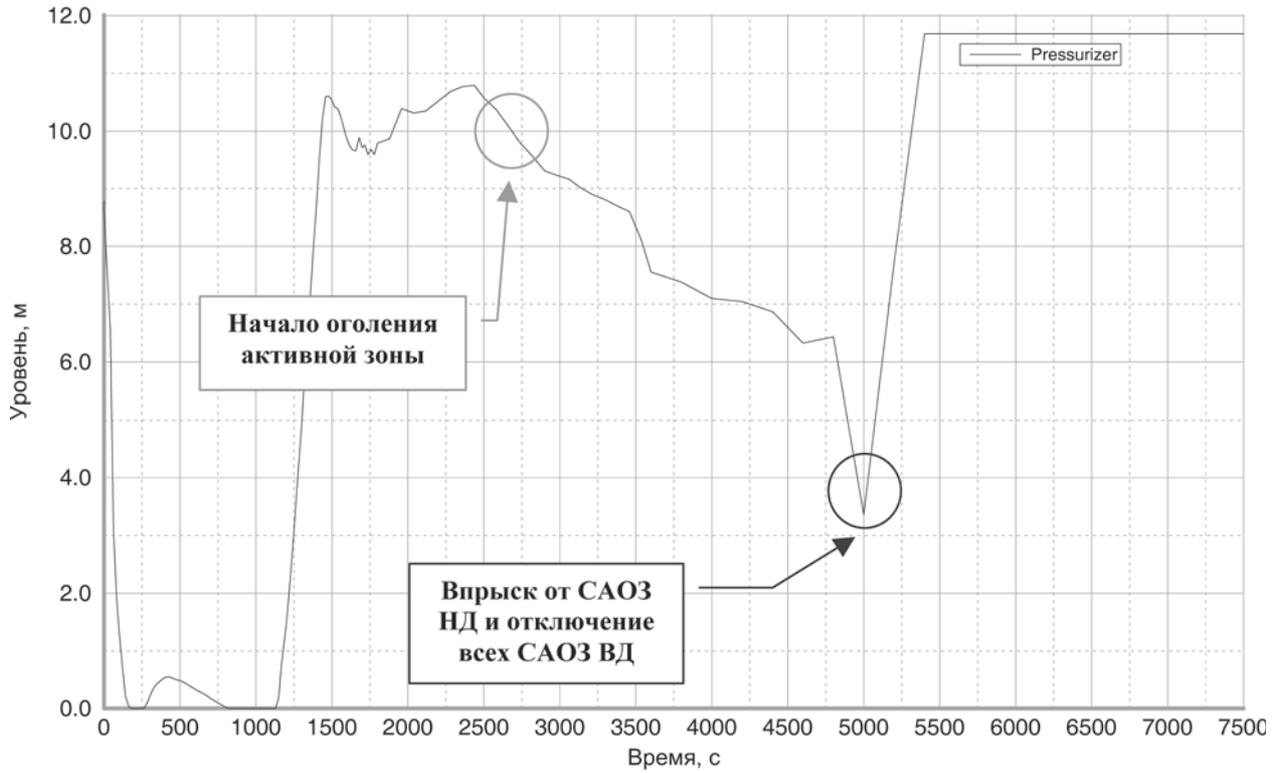


Рис. 5. Уровень в КД (течь Ду 45 мм с действиями персонала согласно ИЛА, сценарий № 10 с открытием арматуры САГ на барботажном баке)

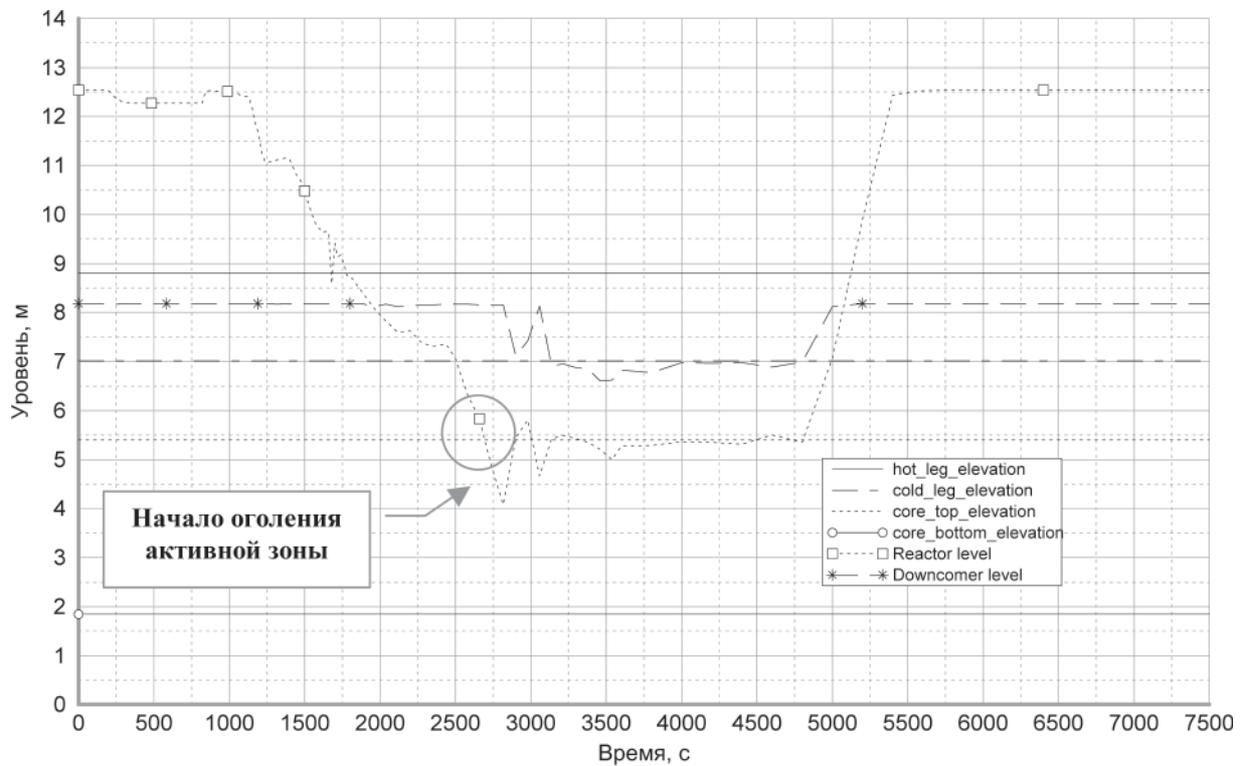


Рис. 6. Уровень в реакторе и опускном участке (течь Ду 45 мм с действиями персонала согласно ИЛА, сценарий № 10 с открытием арматуры САГ на барботажном баке)

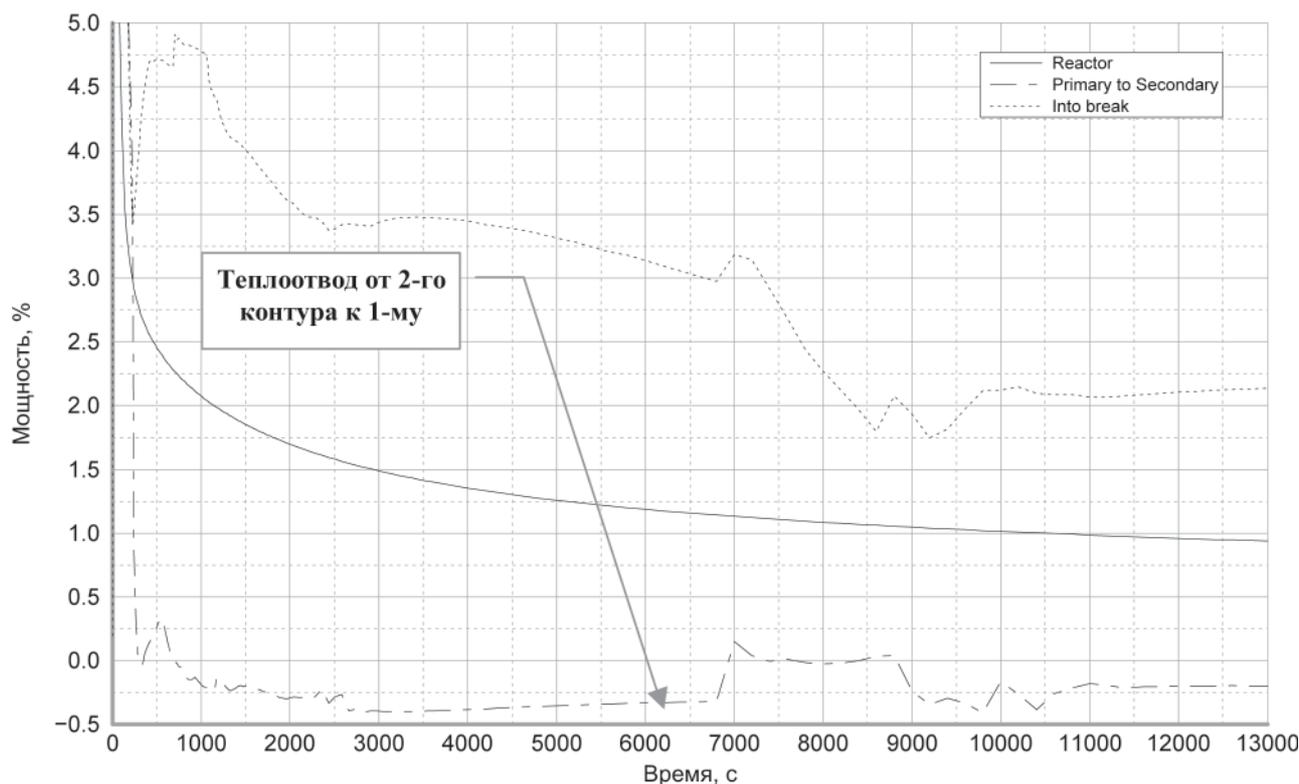


Рис. 7. Мощность реактора, мощность, передаваемая из первого во второй контур, и мощность, выносимая в течь (течь Ду 45 мм с действиями оперативного персонала согласно ИЛА, сценарий № 4)

При увеличении времени расхолаживания РУ повышаются риски, связанные с возможными дополнительными отказами систем безопасности и оборудования, участвующего в преодолении аварии. Наиболее быстрое достижение условий подключения линии планового расхолаживания (согласно ИЛА, температура теплоносителя первого контура не более 110 — 120 °С) позволит минимизировать, в частности, риск такого отказа активных систем САОЗ, как например, засорение фильтров теплообменника САОЗ волокнами теплоизоляции.

Основные факторы, влияющие на риск отказов оборудования (теплообменника САОЗ, насосов САОЗ ВД и др.): количество массы и энергии теплоносителя, поступающего из первого контура через течь в ГО;

количество воды, перекачиваемое насосами САОЗ ВД.

При относительно больших диаметрах течей рассматриваемого диапазона, например 45 мм, имеет место расхолаживание второго контура через первый. При этом энергия второго контура подогревает первый контур, приводя к более позднему времени подключения ЛПР и большому количеству воды и энергии, вынесенных через течь в ГО.

Расчеты течи Ду 45 мм со скоростью расхолаживания 15 °С/ч (согласно ИЛА) подтверждают наличие данной проблемы. В процессе расхолаживания практически постоянно теплоотвод направлен от второго контура к первому (рис. 7). Это указывает на недостаточную скорость расхолаживания второго контура, а следовательно, позволяет заключить, что использование скорости расхолаживания 15 °С/ч не обоснованно для всего диапазона малых течей.

Согласно ИЛА, после снижения давления в первом контуре до 21 кгс/см<sup>2</sup> оператор должен проконтролировать переход насосов аварийного расхолаживания на первый

контур, а затем, не допуская полного заполнения КД, отключить все каналы САОЗ ВД. В некоторых случаях, например при течи Ду 45 мм, в начале работы САОЗ НД происходит интенсивный подогрев первого контура от второго (рис. 8), что может вызвать рост давления в первом контуре выше уровня работы САОЗ НД. При этом, если оператор уже отключил САОЗ ВД, подпитка первого контура прекращается, что в дальнейшем может привести к тяжелому повреждению активной зоны реактора при ее оголении.

В случае течи теплоносителя первого контура, компенсируемой САОЗ ВД, при отказе более одного канала САОЗ ВД (ТQ13) согласно ИЛА дальнейшие действия по управлению аварией следует выполнять в соответствии с документом «Руководство по управлению запроектными авариями» (РЗПА).

Согласно РЗПА, после обнаружения отказа САОЗ ВД необходимо предпринять следующие действия:

заполнить все ПГ до максимально возможного уровня, перевести все БРУ-А и БРУ-К на дистанционное управление и после достижения необходимой концентрации борной кислоты в первом контуре начать расхолаживание через БРУ-А или БРУ-К с максимально возможной скоростью (т. е. при полном открытии всех БРУ-А или БРУ-К);

открыть арматуру на линиях системы аварийного газоподобия, соединяющих оборудование первого контура с барботером;

расхолаживание КД производить впрыском от насосов системы ТК или за счет открытия линии аварийного газоподобия;

в случае «зависания» давления в первом контуре выше 60 кгс/см<sup>2</sup> принять все меры по снижению давления до

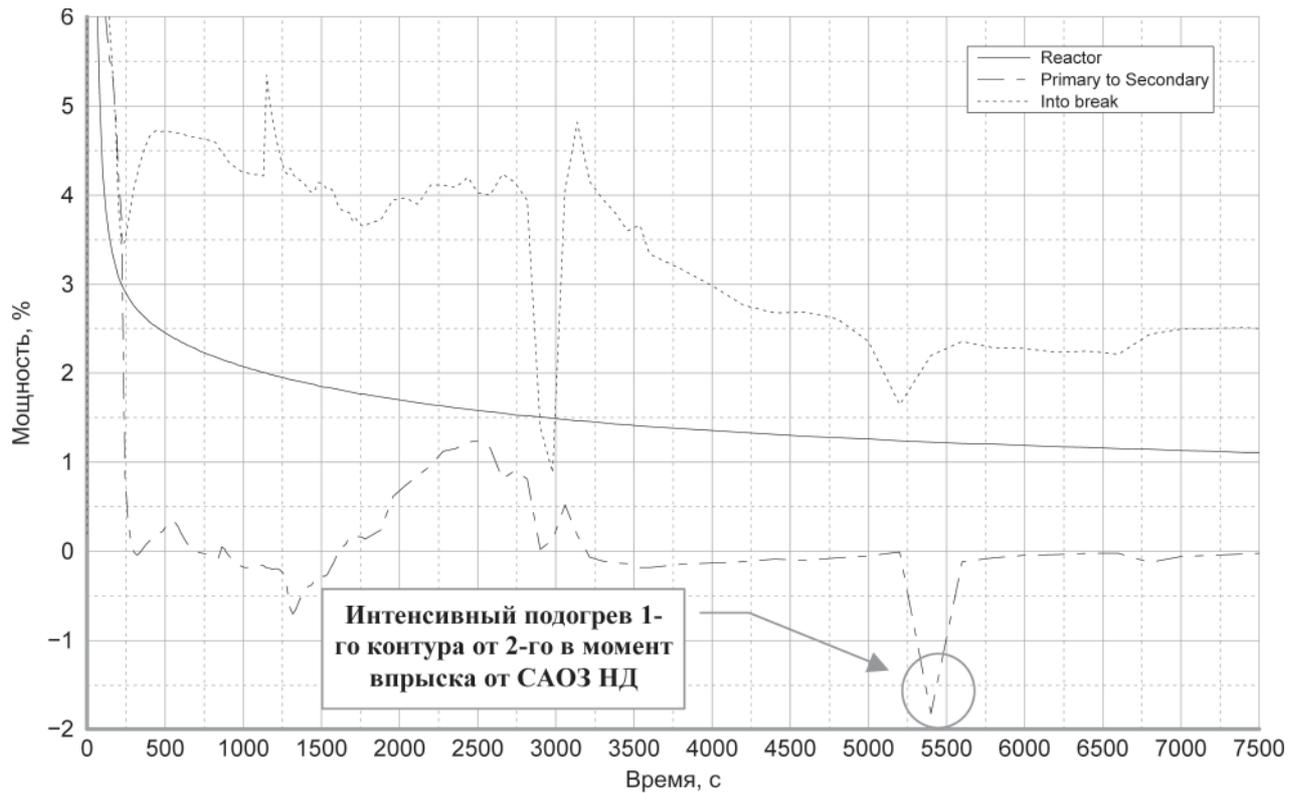


Рис. 8. Мощность реактора, мощность, передаваемая из первого во второй контур, и мощность, выносимая в течь (течь Ду 45 мм с действиями оперативного персонала согласно ИЛА, сценарий № 10 с открытием арматуры САГ)

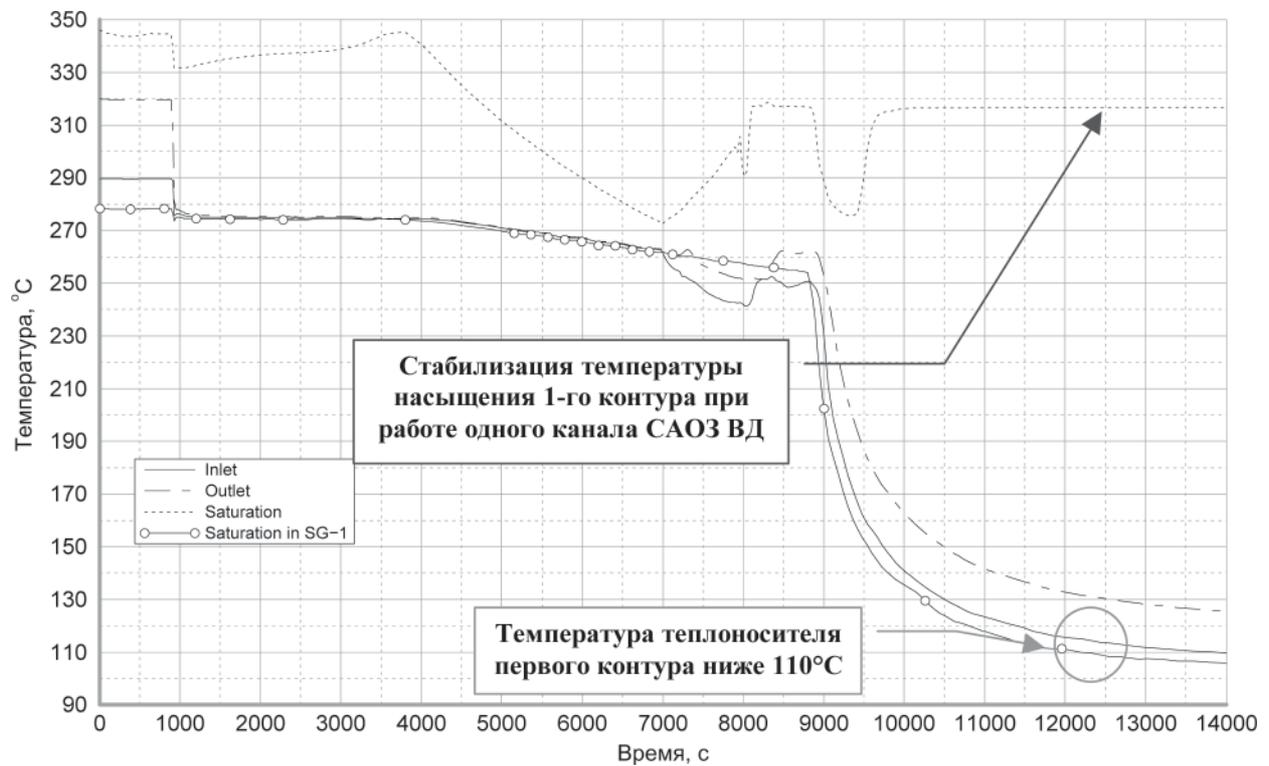


Рис. 9. Температура теплоносителя на входе и выходе из реактора и температура насыщения в реакторе и ПГ-1 (течь Ду 12 мм с отказом двух каналов САОЗ ВД и действиями персонала согласно ИЛА и РЗПА, сценарий № 15 без YR)

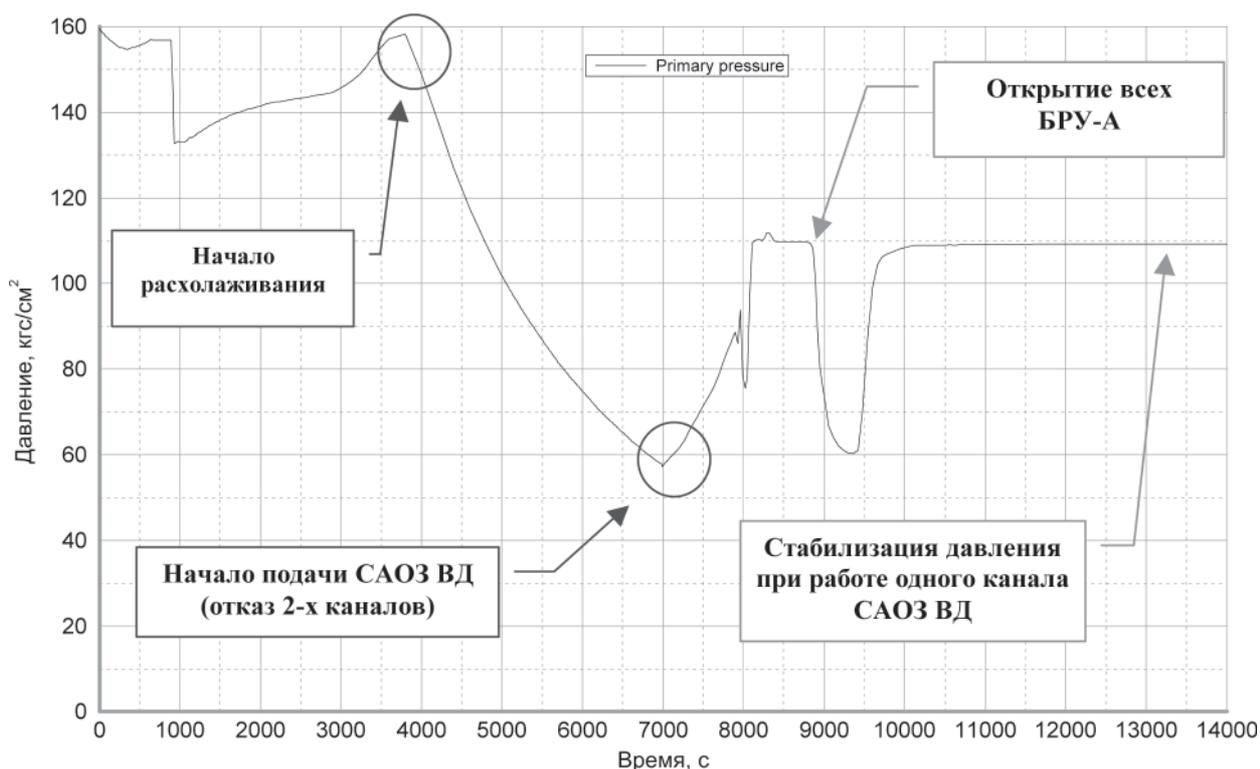


Рис. 10. Давление над активной зоной (течь Ду 12 мм с отказом двух каналов САОЗ ВД и действиями персонала согласно ИЛА и РЗПА, сценарий № 15 без YR)

уставки срабатывания ГЕ САОЗ путем открытия всех линий САГ (YR) на барботер или открытием предохранительных клапанов (ПК) КД.

В рамках данного анализа выполнены расчеты сценариев с течью из первого контура, отказом двух каналов САОЗ ВД и управлением аварийным процессом согласно требованиям РЗПА. В этих расчетах моделировалась течь Ду 12 мм с действиями персонала согласно ИЛА. Отказ САОЗ ВД предполагался в момент их запуска по сигналу « $\Delta T_{s1K} \leq 10^\circ\text{C}$ ». Согласно расчетам, к моменту отказа САОЗ ВД требование по созданию стояночной концентрации бора в первом контуре уже выполнено. Начало расхолаживания через второй контур с максимальной скоростью путем открытия БРУ-А моделируется через 30 мин после отказа САОЗ ВД.

Предписание ИЛА о переходе к управлению аварией согласно РЗПА (в случае отказа более одного канала САОЗ ВД) при одном работоспособном канале САОЗ ВД может иметь различные последствия в зависимости от места течи. Если течь обуславливает шунтирование расхода работающего канала САОЗ ВД (когда место течи расположено в неотсекаемой части напорного трубопровода работающего канала САОЗ ВД или подача теплоносителя осуществляется в петлю с разрывом), то ускоренное расхолаживание приведет к снижению температуры, а в результате и к снижению давления первого контура, поскольку теплоноситель находится в состоянии насыщения. Если указанное шунтирование не происходит и один канал САОЗ ВД компенсирует потерю теплоносителя в течь, то результатом ускоренного расхолаживания будет снижение температуры первого контура (рис. 9), но давление в контуре останется высоким, поскольку последнее будет определяться напорной характеристикой работающего канала САОЗ ВД

(рис. 10). Такое развитие аварии может привести к возникновению условий «холодной переопрессовки».

Сценарий с течью Ду 12 мм при отказе двух каналов САОЗ ВД и управлением аварией согласно ИЛА и РЗПА без действий по снижению давления в первом контуре (открытие САГ) показал, что давление при этом стабилизируется на уровне около  $110 \text{ кгс/см}^2$  через 23 мин после открытия всех БРУ-А (рис. 10), средняя температура теплоносителя на входе в реактор опускается ниже  $110^\circ\text{C}$  через 44 мин (рис. 9), а температура теплоносителя на входе в реактор из петли, куда подает оставшийся в работе САОЗ ВД, опускается ниже  $120^\circ\text{C}$  приблизительно через 48 мин.

При выполнении действий по снижению давления в первом контуре путем открытия арматуры САГ на ББ (табл. 1, сценарий № 16) минимальная температура первого контура снижается до уровня  $110^\circ\text{C}$  приблизительно за 35 мин (рис. 11), а давление первого контура в этот момент превышает  $35 \text{ кгс/см}^2$  (рис. 12).

Таким образом, предписанные РЗПА действия персонала могут приводить к возникновению условий «холодной переопрессовки» (п. 5.2.2.1.2 [14]), когда давление в реакторе превышает допустимое проектом ( $35 \text{ кгс/см}^2$ ) при температуре теплоносителя первого контура ниже  $110^\circ\text{C}$ .

Аналогичный сценарий с отказом двух каналов САОЗ ВД, но без вмешательства оперативного персонала (табл. 1, сценарий № 17) показал, что действиями автоматики обеспечиваются подкритичность РУ, условия охлаждения активной зоны, постоянная подпитка первого и второго контуров. При этом благодаря работе одного канала САОЗ ВД происходит заполнение реактора и КД, а давление первого контура стабилизируется на уровне около  $110 \text{ кгс/см}^2$ . Температура теплоносителя первого контура и соответственно температура оболочек ТВЭЛ медленно снижаются.

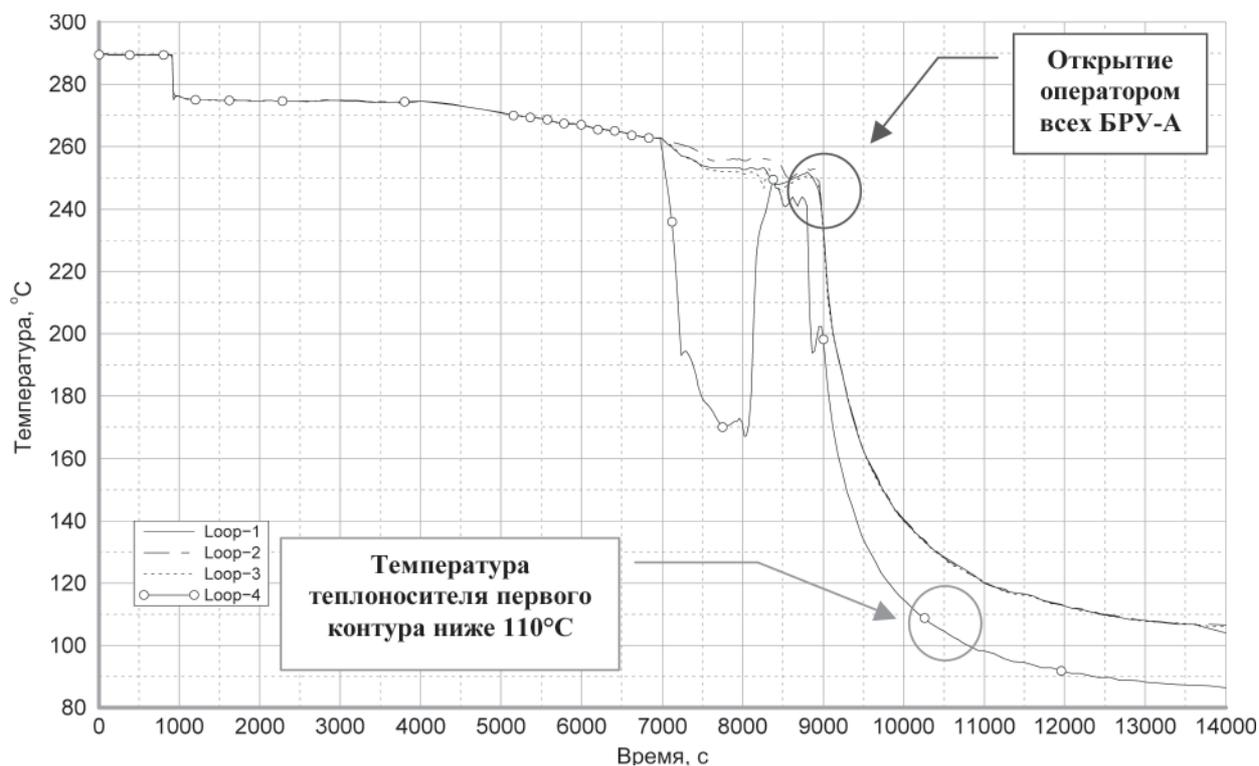


Рис. 11. Температура теплоносителя в холодных нитках ГЦК на входе в реактор (течь Ду 12 мм с отказом двух каналов САОЗ ВД и действиями персонала согласно ИЛА и РЗПА, сценарий № 16 с открытием САГ)

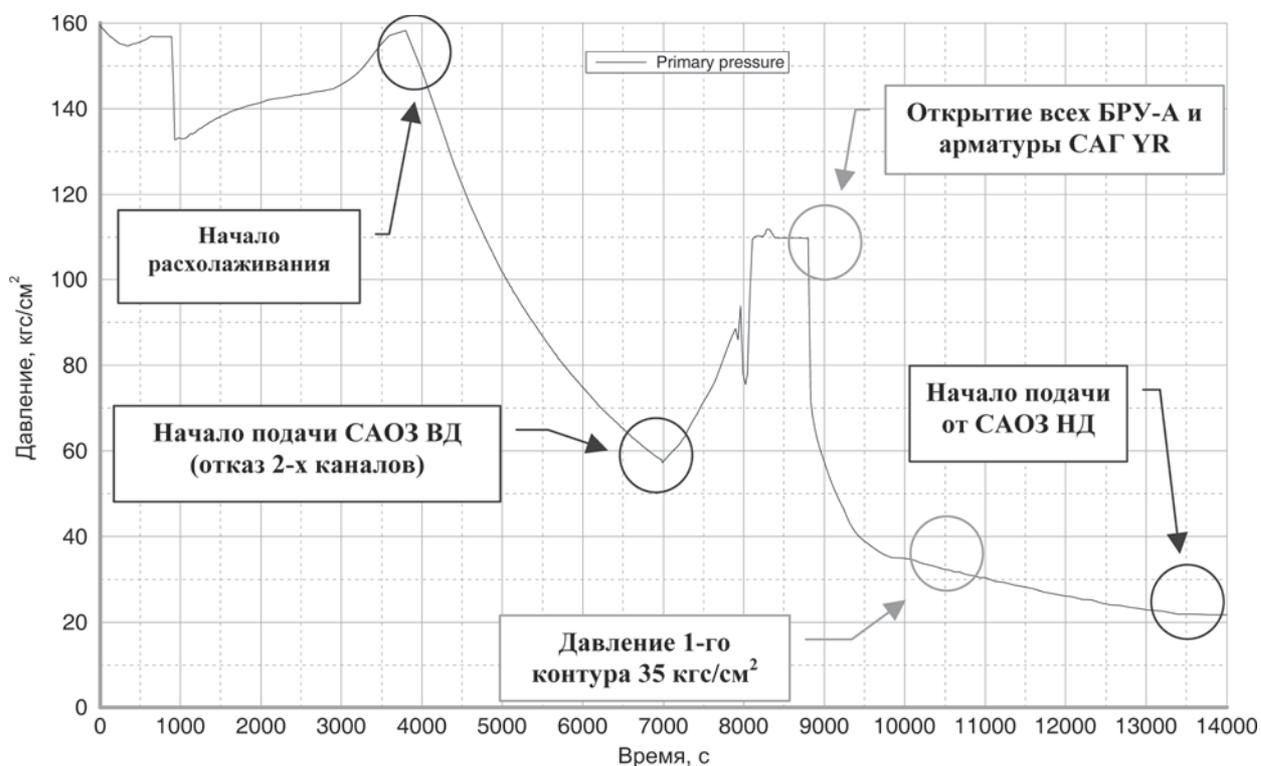


Рис. 12. Давление над активной зоной (течь Ду 12 мм с отказом двух каналов САОЗ ВД и действиями персонала согласно ИЛА и РЗПА, сценарий № 16 с открытием арматуры САГ)

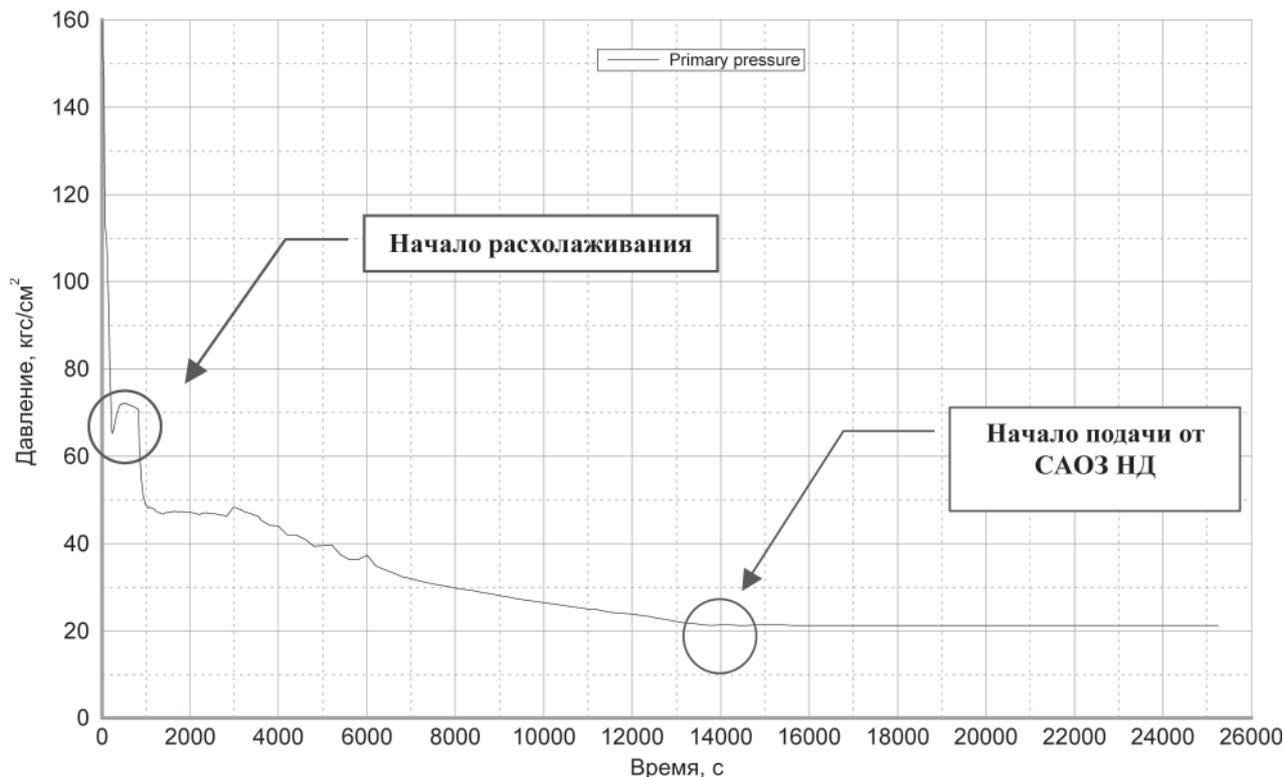


Рис. 13. Давление на выходе из реактора (течь Ду 45 мм с оптимизированными действиями персонала, сценарий № 12)

Для достижения условий подключения ЛПР и перевода РУ в безопасное состояние требуется организация персоналом расхолаживания через второй контур. Таким образом, если течь компенсируется работой одного канала САОЗ ВД, то действия персонала, предписанные РЗПА, являются избыточными, а в некоторых случаях могут повышать риск тяжелой аварии.

Для преодоления обнаруженных, связанных с выполнением предписаний ИЛА и РЗПА, проблем (в частности, обусловленная созданием стояночной концентрации бора задержка начала расхолаживания; нежелательное при расхолаживании срабатывание технологических защит второго контура, неэффективное управление давлением первого контура, недостаточная скорость расхолаживания) были исследованы возможности оптимизации действий персонала при аварии с течью Ду 45 мм (табл. 1, сценарии №№ 11, 12).

В сценарии № 11 реализованы новые условия для расхолаживания и управления работой САОЗ ВД, а именно: расхолаживание РУ начинается не дожидаясь создания стояночной концентрации бора в первом контуре;

при снижении температуры первого контура на  $40^{\circ}\text{C}$  и ниже температуры насыщения второго контура выполняется переключение скорости расхолаживания через БРУ-К с  $15^{\circ}\text{C}/\text{ч}$  на  $30^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ ;

по достижении уровня в КД 8 м при условии сохранения запаса температуры теплоносителя первого контура до насыщения оператор осуществляет периодическую подпитку от САОЗ ВД, поддерживая уровень в КД около 8 м.

В сценарии № 12 предполагается, что персоналу не удастся ввести в работу систему подпитки-продувки первого контура (после ее локализации по сигналу  $\Delta T_{s1K} \leq 10^{\circ}\text{C}$ ), вдобавок к указанным для сценария № 11 реализованы дополнительные действия по расхолаживанию КД, а именно:

одновременно с началом расхолаживания через второй контур моделируется открытие арматуры САГ из КД на ББ и заполнение КД до уровня 7 м (при повышении уровня в КД более 4,2 м оператор не включает ТЭН);

по достижении уровня в КД 7 м оператор закрывает арматуру САГ, дальнейшее расхолаживание КД моделируется путем открытия линии сдвухи УР24.

В рассмотренных сценариях отсутствуют проблемы, отмеченные при управлении аварийным процессом согласно ИЛА, а также обеспечивается более плавное снижение параметров первого и второго контуров. Так, в сценарии № 12 благодаря открытию арматуры САГ происходит быстрое заполнение КД, а затем поддержание уровня при открытой сдвухе УР24, отключенных ТЭН КД и периодической подпитке от САОЗ ВД. После отключения САОЗ ВД давление первого контура снижается до уровня работы САОЗ НД (рис. 13). Увеличение скорости расхолаживания через БРУ-К до  $30^{\circ}\text{C}/\text{ч}$  (при снижении температуры первого контура на  $40^{\circ}\text{C}$  ниже температуры насыщения второго контура) обеспечивает восстановление стабильного теплоотода от первого контура ко второму (рис. 14). Подкритичность на всем протяжении аварийного процесса обеспечивается путем срабатывания аварийной защиты реактора, а далее подачей борированной воды в первый контур от САОЗ ВД и ГЕ (рис. 15). При этом видно, что ввод положительной реактивности за счет снижения температуры теплоносителя первого контура существенно меньше, чем отрицательной за счет борирования от САОЗ. К моменту достижения температуры первого контура  $110^{\circ}\text{C}$  (условие подключения ЛПР) в течь выносится около 2650 т теплоносителя с общей энергией  $1,68 \cdot 10^6$  МДж, что существенно меньше, чем в том же случае течи, но с действиями персонала согласно ИЛА (около 6400 т теплоносителя с общей энергией  $3,15 \cdot 10^6$  МДж).

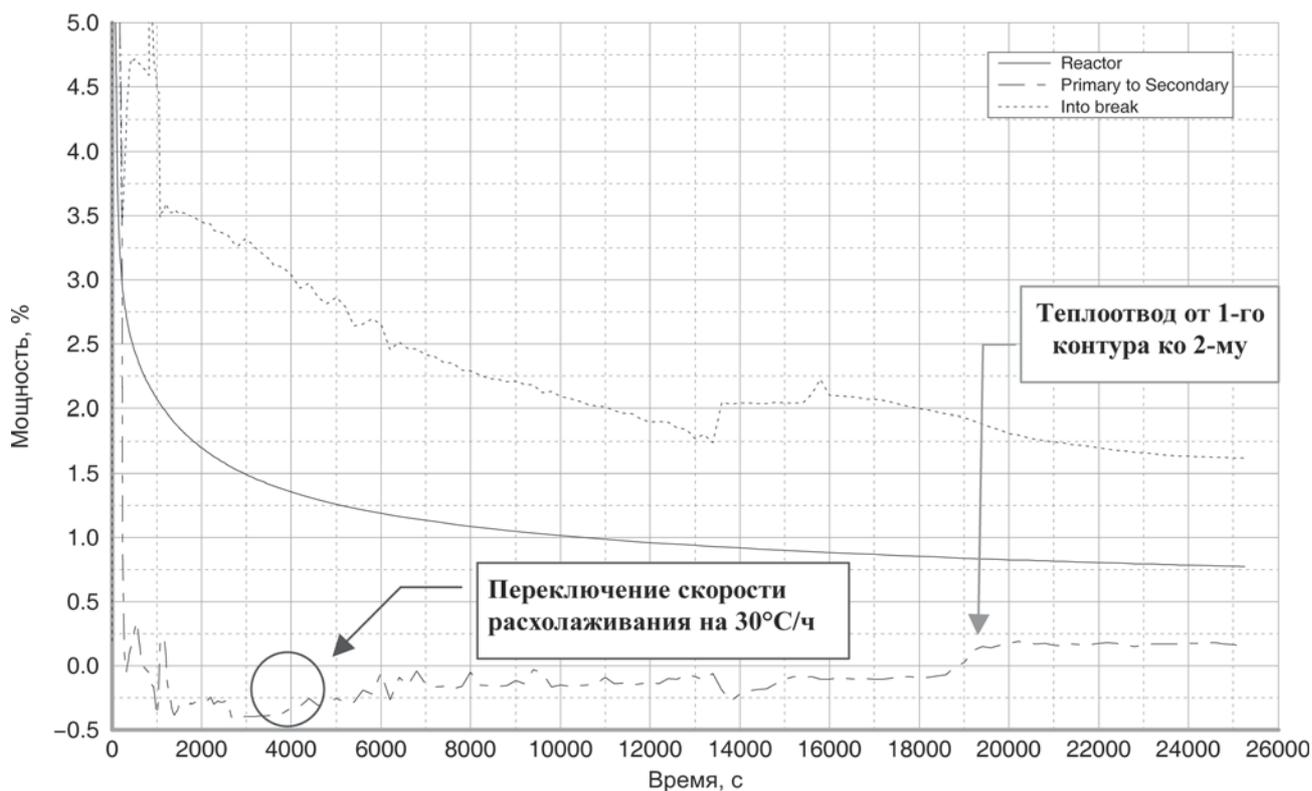


Рис. 14. Мощность реактора, мощность, передаваемая из первого во второй контур, и мощность, выносимая в течь (течь Ду 45 мм с оптимизированными действиями персонала, сценарий № 12)

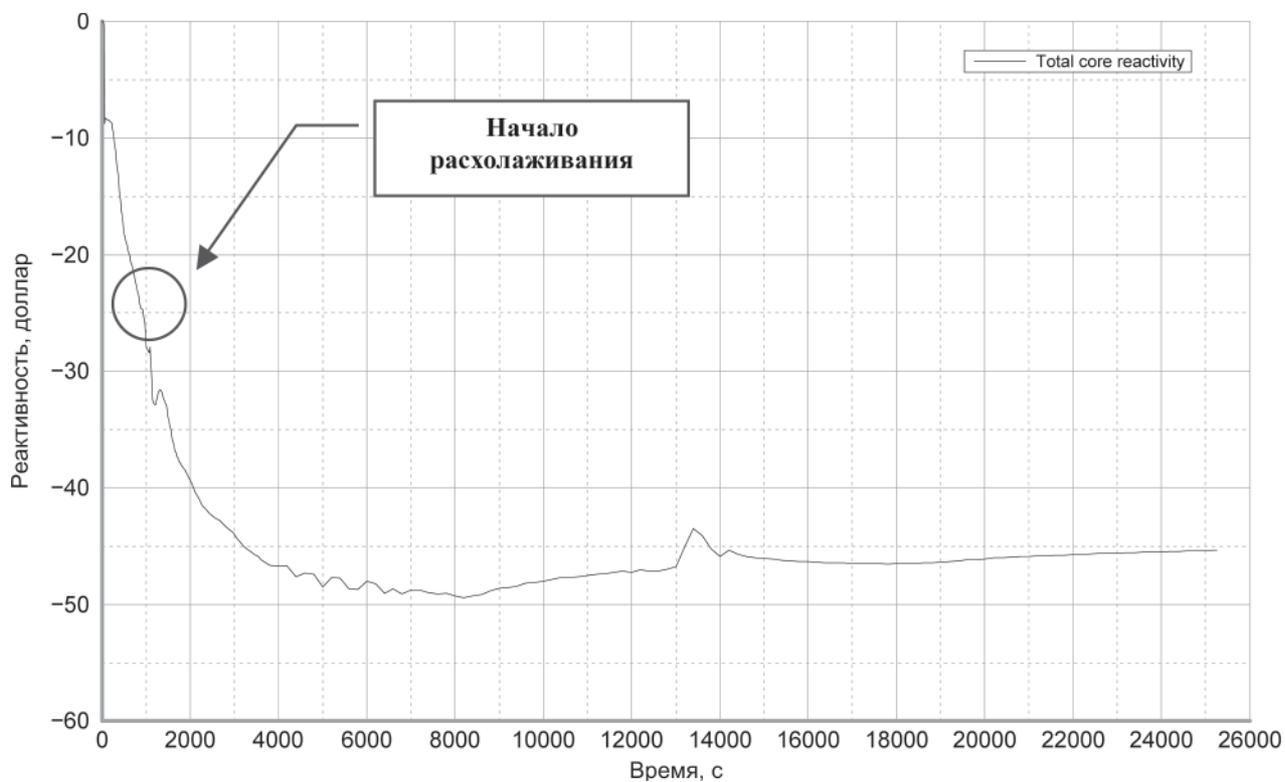


Рис. 15. Реактивность (течь Ду 45 мм с оптимизированными действиями персонала, сценарий № 12)

Для достижения безопасного стабильного состояния необходимо обеспечить отвод остаточных тепловыделений с помощью САОЗ НД по линии планового расхолаживания. Для этого необходимо обеспечить соответствующие параметры первого контура (давление и температуру). Результаты расчета сценария № 12 с оптимизированными действиями оперативного персонала показывают, что с помощью предлагаемой стратегии требуемые параметры первого контура достигаются на 5 ч быстрее, чем в аналогичном случае при действиях персонала согласно ИЛА (сценарий № 7), что доказывает эффективность рассмотренных оптимизированных действий персонала по управлению аварией с малой некомпенсируемой течью в пределах ГО.

Представленные результаты рассматриваемого аварийного процесса подтверждают исключительно высокий уровень влияния противоаварийных действий оперативного персонала АЭС на безопасность. Действующие противоаварийные процедуры требуют корректировки для устранения недостатков и противоречий. При этом имеются широкие возможности по снижению риска тяжелых аварий реакторной установки за счет повышения эффективности управления аварийными процессами и оптимального использования существующих технических возможностей, заложенных в проекте ВВЭР.

## Литература

1. *НП 306.1.02/1.034-2000*. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. — К., 2000.
2. *International Atomic Energy Agency*. Working material on Workshop on Harmonization of PSA Methodology Approaches for WWER-1000 Reactors and Comparison of PSA Results, 9-13 July 2002, Berlin, Germany», IAEA-NSNI, TC Project RER/9/068. — Vienna, 2003.
3. *International Atomic Energy Agency*. Working material on Workshop Harmonization of PSA Methodology Approaches for VVER-440 Reactors and Comparison of PSA Results, 4-8 March 2002 Bratislava, Slovak Republic. IAEA-NSNI, TC Project RER/9/068. — Vienna, 2002.

4. *ОП “Ровенская АЭС” НАЭК “Энергоатом”*. Отчет по анализу безопасности энергоблока № 1 РАЭС. Материалы раздела “Вероятностный анализ безопасности”. Итоговый отчет, 22.1.27.ОБ.04. — Кузнецовск, 2002.
5. *НАЭК “Энергоатом”*. Отчет по анализу безопасности. Вероятностный анализ безопасности. Блок № 1 Южноукраинской АЭС, 23.1.27.ОБ.04. — Южно-Украинск, 1999.
6. *Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки*. Звіт про виконання державної експертизи ядерної та радіаційної безпеки: За матеріалами, які представлені у Додатку до звіту з аналізу безпеки енергоблоку № 5 ЗАЕС “Імовірнісний аналіз безпеки”, № 2002 — ІАБ — 1492 — 53АБ. — 2002.
7. *Gesellschaft für Anlagen-und Reaktorsicherheit (GRS) mbH*. Part 2 of Peer Reviews of PSAs for Ukrainian NPPs. Review of the PSA of Rivne unit 1. Project TAP2002-01. — 2004.
8. *International Atomic Energy Agency*. Report of the IPSART Mission to the Zaporozhye Unit 5 Nuclear Power Plant Level 1 Probabilistic Safety Assessment in Ukraine, 11-20 June 2001, IAEA-TCR-01054. — 2002.
9. *International Atomic Energy Agency*. Comments and Questions on the National Report of Ukraine in 2005 (Convention on Nuclear Safety). — 2005.
10. *ГНТЦ ЯРБ*. Исследование влияния на риск тяжелой аварии действий оперативного персонала при разуплотнении первого контура РУ ВВЭР-1000/320 (малые течи в пределах гермообъема) и отказа САОЗ ВД: Научно-технический отчет, Ревизия 0. — К., 2005.
11. *ОП “Запорожская АЭС” НАЭК “Энергоатом”*. Инструкция по ликвидации аварий и аварийных ситуаций на реакторной установке. 00.ГТ.00.ИЭ.105.Б.
12. *ОП “Запорожская АЭС” НАЭК “Энергоатом”*. Инструкция по ликвидации аварий и аварийных ситуаций на реакторной установке энергоблока № 5 ЗАЭС. 05.ГТ.00.ИЭ.11.
13. *US Nuclear Regulatory Commission*. Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Application, Final Report. NUREG/CR-1278.
14. Реакторная установка В-320. Техническое описание и информация по безопасности 320.00.00.00.000. Д61/ ОКБ “Гидропресс”. — 1987.
15. Обновление ВАБ для целей риск-ориентированных применений. Описание модифицированной расчетной модели RELAP и набор входных данных для кода RELAP5/MOD3.2. Запорожская АЭС. Энергоблок № 5. — 2004.
16. *ОП “Запорожская АЭС” НАЭК “Энергоатом”*. Руководство по управлению запроектными авариями на Запорожской АЭС. 00.ГТ.Рг.04А.