

## Валидация теплогидравлической модели реактора ВВЭР-1000 для компьютерного кода RELAP5/MOD3.2 по оценке условий термошока корпуса реактора

Проведена валидация модели реактора ВВЭР-1000 для компьютерного кода RELAP5/MOD3.2 с подробным моделированием опускного участка при помощи азимутального разделения на 20 вертикальных каналов с соединением поперечными связями. В качестве экспериментальных данных для сравнения использованы измеренные параметры нарушения с незакрытием предохранительного клапана (ПК) компенсатора давления (КД) на энергоблоке № 3 Ровенской АЭС. Модель применяется для оценки формирования условий термошока корпуса реактора.

*Ключевые слова:* корпус реактора, расчетная модель, термошок, термоудар, перемешивание в опускном участке, стратификация потоков, валидация.

**Ю. Ю. Воробьев, О. Р. Кочарьянц**

### Валідація теплогидравлічної моделі реактора ВВЕР-1000 для комп'ютерного коду RELAP5/MOD3.2 щодо оцінки умов термошоку корпусу реактора

Проведено валідацію моделі реактора ВВЕР-1000 для комп'ютерного коду RELAP5/MOD3.2 з детальним моделюванням опускної ділянки за допомогою азимутного розділення на 20 вертикальних каналів із з'єднанням поперечними зв'язками. За експериментальні дані для порівняння використано виміряні параметри порушення з незакрыттям запобіжного клапана (ЗК) компенсатора тиску (КТ) на енергоблоці № 3 Рівненської АЕС. Модель використовується для оцінки формування умов термошоку корпусу реактора.

*Ключові слова:* корпус реактора, розрахункова модель, термошок, термоудар, перемішування в опускній ділянці, стратифікація потоків, валідація.

© Ю. Ю. Воробьев, О. Р. Кочарьянц, 2011

В последнее время особое внимание уделяется теплогидравлическим аспектам взаимодействия материала корпуса реактора со смесью теплоносителя и борного раствора, который подается в первый контур насосами системы аварийного охлаждения зоны (САОЗ). Важность достоверного определения термодинамических параметров теплоносителя и феноменологии теплогидравлических процессов в опускной камере реактора определяется тем, что термические и гидравлические нагрузки, которые возникают при попадании холодной воды на металл конструкций, могут быть опасными с точки зрения как циклической прочности, так и хрупкого разрушения.

Для получения локальных характеристик в рамках данной работы используется модель установки ВВЭР-1000 для одномерного расчетного кода RELAP5/MOD3.2 с разбиением опускного участка реактора на систему параллельных каналов с учетом перетечек между ними. Актуальность связана с адаптацией к конкретной конфигурации самого массового в Украине вида реакторов ВВЭР-1000 и дальнейшим применением для оценки условий по хрупкому разрушению металла корпуса.

Исходной моделью является четырехпетлевая модель РУ, разработанная для энергоблока № 5 Запорожской атомной электростанции (ЗАЭС) в рамках проекта углубленного анализа безопасности. Развитие модели представлено в [1], [2], [3]. Модель ориентирована на реалистичные расчеты поведения РУ и использовалась для обоснования модернизации энергоблоков ВВЭР-1000 и аналитического обоснования симптомно-ориентированных аварийных инструкций (СОАИ).

Опускной участок разбит путем азимутального разделения на 20 вертикальных каналов (по пять на каждый из четырех секторов) с соединением поперечными связями [4]. Данная технология называется методом параллельных каналов и используется в международной практике, например для оценки риска разрушения корпуса реактора [5]. Использование данной технологии не заменяет трехмерного моделирования опускного участка, так как расчетный код упрощенно рассчитывает характеристики связей и объемов в поперечных направлениях. Более того, в таком случае отсутствует радиальное разделение опускного участка.

При моделировании большое внимание уделено настройке модели реактора после проведенного разбиения, постановке тестовых задач со сравнительным анализом согласно международной практике, анализу поведения жидкости в опускном участке [4].

**Общий подход к валидации.** Валидация расчетной модели проводится сравнением расчетного поведения параметров с измеренными значениями для избранного исходного события (ИС). Сравниваются отдельно численные значения параметров для начального состояния на номинальной мощности, начального состояния перед ИС и затем для самого переходного процесса. Критериями сравнения выбираются как численные значения параметров, так и временные рамки событий. Для снижения субъективного фактора применяются численные критерии оценки (коды соответствия). Переходный процесс разбивается на характерные интервалы времени и сравнение производится по интервалам отдельно для временной оценки точности расчетного моделирования.

Численные значения, полученные в результате расчета стационарного состояния на номинальной мощности,

Таблица 1. Результаты расчета стационарного состояния

Параметр	Ссылочное значение	Расчетная величина
Тепловая мощность реактора, МВт	3000±60	3000
Давление на выходе из реактора, кгс/см <sup>2</sup>	159±2	158,7
Температура холодных ниток (ХН), °С	289,7	289,6–289,8
Температура горячих ниток (ГН), °С	320	319,8–319,9
Максимальная температура топлива, °С	1883	1890
Расход теплоносителя в холодных нитках, м <sup>3</sup> /ч	21200±1000/1200	21225–21265
Уровень теплоносителя в КД, м	8,77±0,15	8,67
Давление в паропроводах парогенераторов (ПГ), кгс/см <sup>2</sup>	63±1	62,9
Уровень в ПГ по уровнемеру с базой 4 м на “холодном” днище, м	2,25±0,05	2,16–2,26
Расход питательной воды в ПГ, т/ч	1470±60	1477–1485

приведены в табл. 1 в сравнении с требованиями технического обоснования безопасности (ТОБ) [6] и технологического регламента безопасной эксплуатации, действующего на энергоблоке № 3 РАЭС [7]. Анализ указывает на совпадение расчетных величин с требованиями эксплуатационной и проектной документации, стационарное состояние оценивается как приемлемое.

Для валидации измененной модели реактора ВВЭР-1000 выбирается нарушение «Незакрывание главного предохранительного клапана ИПУ КД УР21S01 во время плановой проверки работоспособности реальным повышением давления в первом контуре перед пуском энергоблока № 3 после ППР из-за подклинивания в седле золотника импульсного клапана УР21S04 после его открытия» [8], [9]. Данное нарушение характеризуется:

поведением РУ при течи первого контура из парового пространства КД;

работой каналов САОЗ высокого давления (ВД);

работой каналов САОЗ низкого давления (НД).

Таким образом, имеется возможность определить расчетные возможности модели для моделирования процессов, связанных с течами первого контура, в применении к захлаживанию корпуса реактора.

Данный инцидент очень близок к постулируемому ИС «Непреднамеренное открытие ПК КД» в анализе термошока корпуса реактора [10], так как он произошел при низкой мощности реактора после ППР и перегрузки активной зоны. Это приводит к низкому энерговыделению в активной зоне и, как следствие, к низкой и неустойчивой естественной циркуляции.

Основное внимание будет уделено соответствию теплогидравлических параметров первого контура, которые очень важны для анализа термошока корпуса реактора,

Таблица 2. Коды соответствия

Качественный критерий	Код	Описание
Отличное соответствие	Код 5	Параметр в пределах проектной точности; события по данному параметру произошли
Хорошее соответствие	Код 4	Параметр в пределах трех проектных точностей определения, за исключением моментов, когда выход его за рамки является временным и важность данного параметра в моменты выхода для целей расчетного анализа низкая; события по данному параметру произошли
Удовлетворительное соответствие	Код 3	Параметр находится в пределах пяти проектных точностей определения, за исключением моментов, когда выход его за рамки является временным и важность данного параметра в моменты выхода для целей расчетного анализа низкая; параметры расчета и АЭС могут быть совмещены путем сдвига по времени или по параметру, что указывает на их корреляцию; события по данному параметру произошли.
Минимальное соответствие	Код 2	Параметр находится за пределами пяти проектных точностей определения (не более 50 %), но сохраняет тенденцию экспериментально определенного параметра. Параметры расчета и АЭС могут быть совмещены путем сдвига по времени или по параметру, что указывает на их корреляцию; события по данному параметру произошли, однако значительно сдвинуты во временных рамках. Возможно наличие одного ложного срабатывания или несрабатывания, обусловленного отличием расчетной величины от экспериментальной
Неудовлетворительное соответствие	Код 1	Параметр находится за пределами пяти проектных точностей определения и не сохраняет тенденцию экспериментально определенного параметра. Параметры расчета и АЭС не могут быть совмещены путем сдвига по времени или по параметру, что указывает на отсутствие их корреляции; события, активирующиеся по данному параметру (защиты, блокировки и т. д.), не произошли или не соответствуют экспериментальным данным (два события и более)

результатам, измеренным при нарушении. Это следующие параметры:

- давление первого контура;
- температура холодных ниток (ХН), опускного участка, активной зоны;
- температура корпуса реактора;
- расход САОЗ.

Сравнение данных параметров позволяет сделать вывод о применимости модели. Распределение температур в азимутальном направлении опускного участка и в самом опускном участке не измеряется непосредственно на АЭС. Данные параметры оцениваются при помощи подходов, принятых при моделировании. Далее приводятся критерии соответствия расчетных и измеренных параметров. Данная система критериев расширена по сравнению с [11].

Время расчетного анализа разбивается на шесть интервалов, которые определяются инженерно по происходящим явлениям и тенденциям изменения параметров:

Время, с	Описание
0–300	Характеризуется паровым истечением из ПК КД до момента достижения минимального уровня в КД
300–500	Характеризуется паровым истечением из ПК КД с повышением уровня в КД практически до 10 м
500–2000	Характеризуется двухфазным истечением из ПК КД до момента достижения максимального уровня в КД и начала однофазного водяного истечения
2000–3000	Характеризуется водяным истечением из ПК КД до момента перегиба температуры на выходе активной зоны (в расчетном анализе). На данной фазе работает САОЗ ВД; САОЗ НД не подает воду в первый контур
3 000–5000	Характеризуется водяным истечением из ПК КД до момента стабилизации температуры на выходе активной зоны (в расчетном анализе). На данной фазе отключается САОЗ ВД и начинает работать САОЗ НД
5000–10000	Характеризуется водяным истечением из ПК КД до конца расчетного анализа. На данной фазе отключаются все кроме одного насоса САОЗ НД

В табл. 3 приведены параметры расчета начального состояния перед ИС.

Таблица 3. Результаты расчета начального состояния

Параметр	Данные АЭС	Расчетное значение
Тепловая мощность реактора, МВт	1,67	1,67
Давление на выходе из реактора, кгс/см <sup>2</sup>	186,5	186,7
Температура теплоносителя на входе в реактор (ХН), °С	267,0–268	268,7
Температура теплоносителя на выходе из реактора (ГН), °С	271,0	272,5
Средний подогрев на реакторе по показаниям температур петель, °С	3,6	3,8
Уровень теплоносителя в КД YP10L06, м	5,28	5,26
Давление в паропроводах ПГ, кгс/см <sup>2</sup>	56,0–56,2	55,8

При моделировании аварийного процесса некоторые параметры задаются в качестве граничных условий, что продиктовано как границами моделирования, так и действиями оператора. Включение и отключение каналов САОЗ ВД осуществлялись оператором вручную и автоматически, поэтому моделировались также граничными условиями расчета. Для оценки моделирования выбранного нарушения принят подход упрощенного моделирования условий:

- давления по второму контуру (давление и уровень в ПГ определялись как граничные условия);
  - ввода в работу и вывода каналов САОЗ ВД (моменты включения и отключения);
  - вывода каналов САОЗ НД (моменты отключения).
- Момент включения в работу САОЗ НД определяется расчетом переходного процесса.

**Результаты анализа.** В табл. 4 представлена хронология событий при открытии ПК КД, на рис. 1–20 даны результаты расчета.

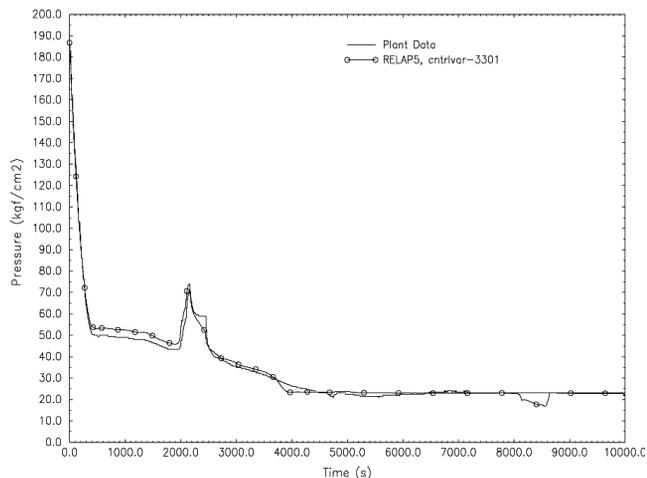


Рис. 1. Давление на выходе из реактора

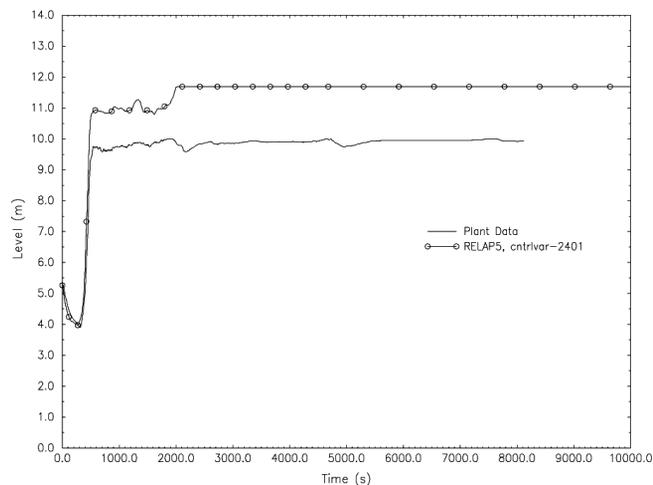


Рис. 2. Уровень в КД YP10L06 (для блокировки YPF02)

Таблица 4. Последовательность событий

Время по данным АЭС, с	Время по данным расчета, с	Описание
0	0	Начало переходного процесса. Открытие ПК КД
62–65	60	Включение всех групп ТЭН
120	120*	Отключение продувки первого контура
135	125	Отключение всех ТЭН КД. Уровень в КД менее 4,2 м
300	315	Снижение минимального запаса до насыщения в горячих нитках менее 10 °С
315	330	Открытие обратных клапанов ГЕ САОЗ, начало подачи от ГЕ САОЗ, давление первого контура менее 60 кгс/см <sup>2</sup>
845	845*	Начало подачи от TQ13D01, действие оператора
1045	1045*	Прекращение подачи от TQ13D01
1205	1205*	Начало подачи от TQ23D01, действие оператора
1765	1765*	Начало подачи от TQ33D01, действие оператора
2068	2068*	Давление в ГО более 0,3 кгс/см <sup>2</sup> . Закрытие локализирующей арматуры. Запуск на рециркуляцию САОЗ НД, начало подачи спринклерных насосов, прекращение подпитки первого контура
2085	2085*	Начало подачи от TQ13D01 по сигналу САОЗ
2160	2160*	Выведен из работы на первый контур насос TQ33D01
2440	2440*	Выведен из работы на первый контур насос TQ23D01
3525	3525*	Выведен из работы на первый контур насос TQ13D01
4485	3900	Начало подачи от насосов САОЗ НД TQ12,22,32D01
4935	4935*	Выведен из работы на первый контур насос TQ22D01
5055	5055*	Выведен из работы на первый контур насос TQ32D01
5475	5800	Все уровни в ПГ на холодном коллекторе равны 3,8м
6375	—	Снижение температуры во всех горячих нитках менее 70 °С
Окончание расчета	10000	Минимальная температура воды на входе в реактор 40 °С, температура на выходе активной зоны 63 °С, давление первого контура 23 кгс/см <sup>2</sup>

\* Значение является граничным условием расчета.

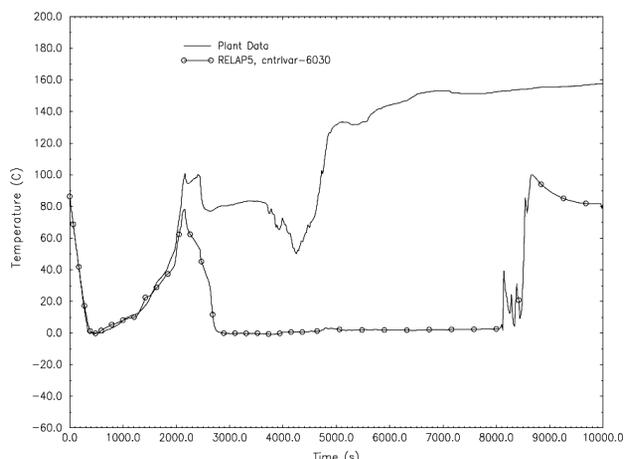


Рис. 3. Минимальный запас до насыщения в горячих нитках

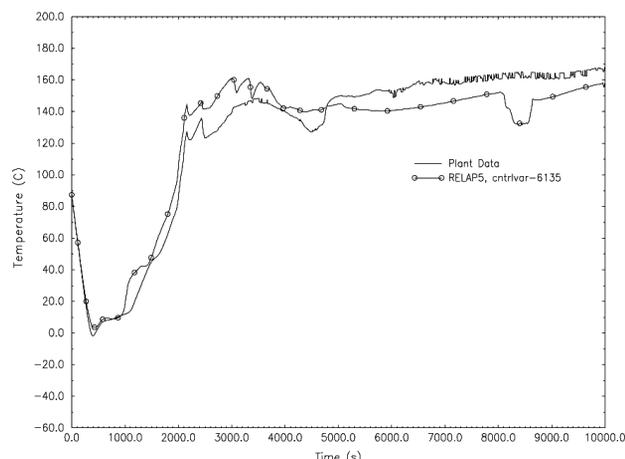


Рис. 4. Запас до насыщения на выходе активной зоны

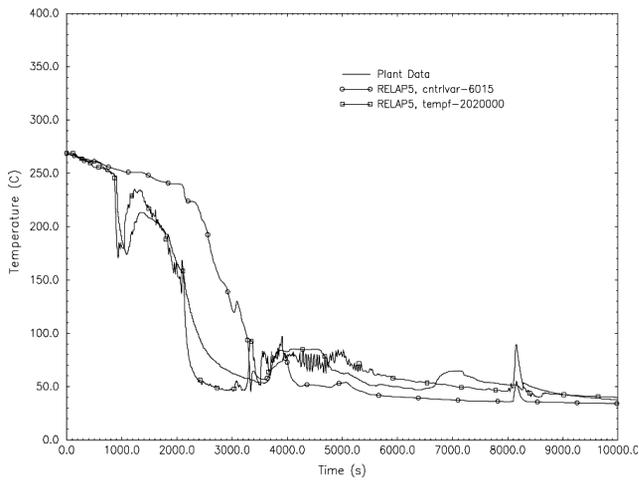


Рис. 5. Температура ХН петли 1, температура на входе в реактор

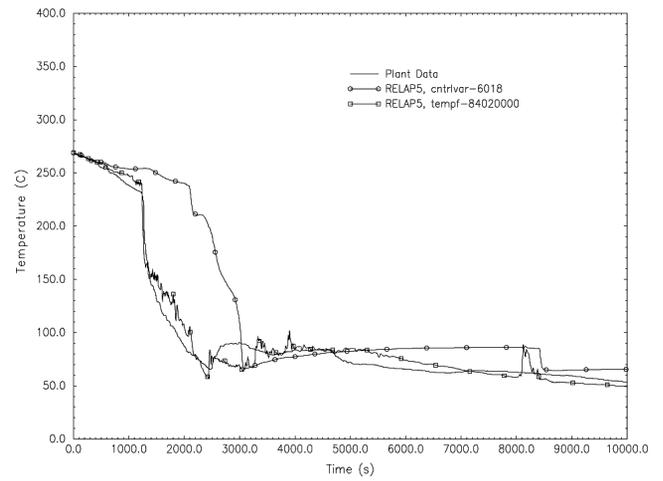


Рис. 8. Температура ХН петли 4, температура на входе в реактор

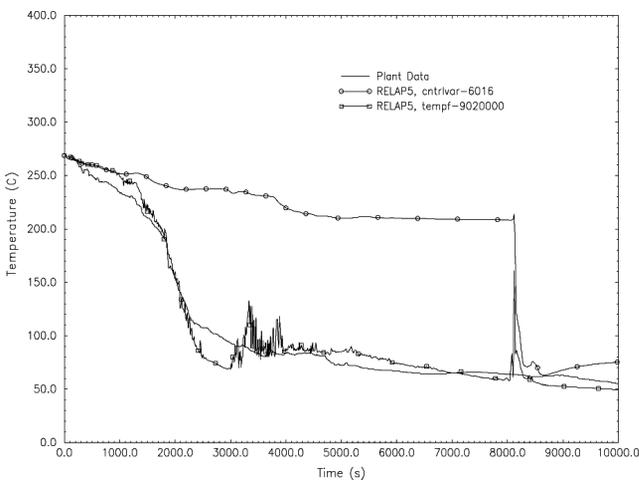


Рис. 6. Температура ХН петли 2, температура на входе в реактор

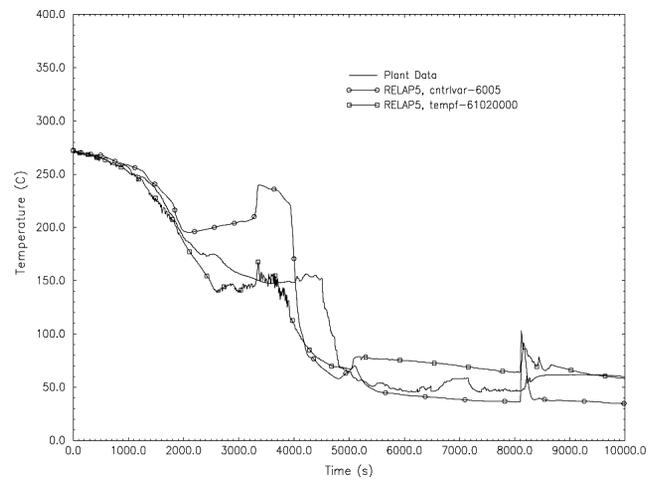


Рис. 9. Температура ГН петли 1, температура на выходе реактора

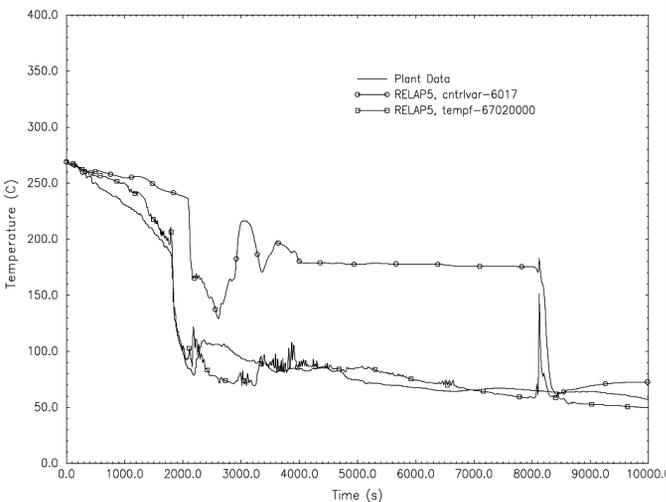


Рис. 7. Температура ХН петли 3, температура на входе в реактор

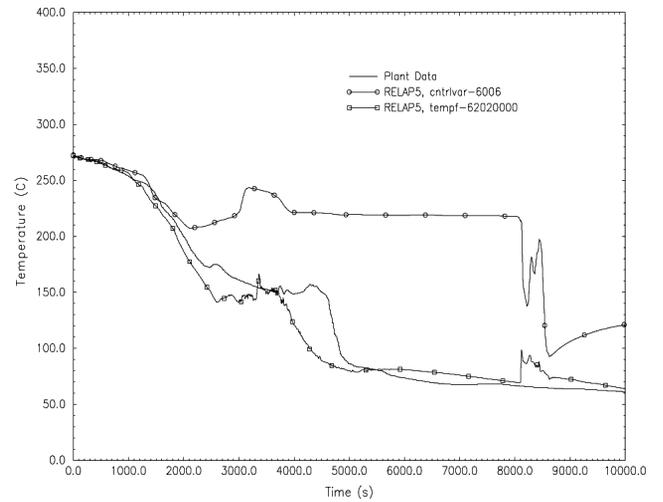


Рис. 10. Температура ГН петли 2, температура на выходе реактора

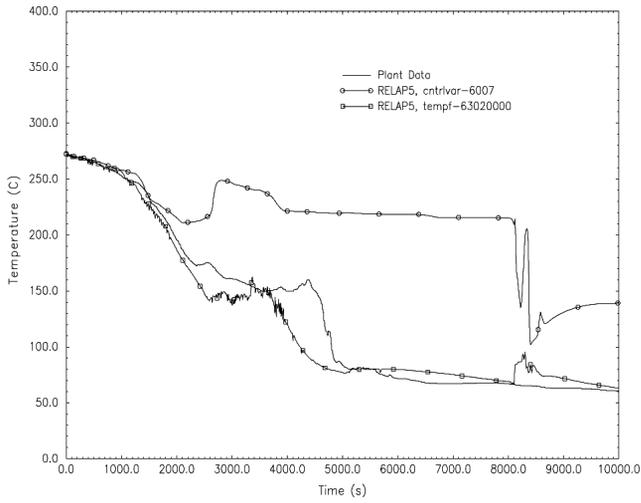


Рис. 11. Температура ГН петли 3, температура на выходе реактор

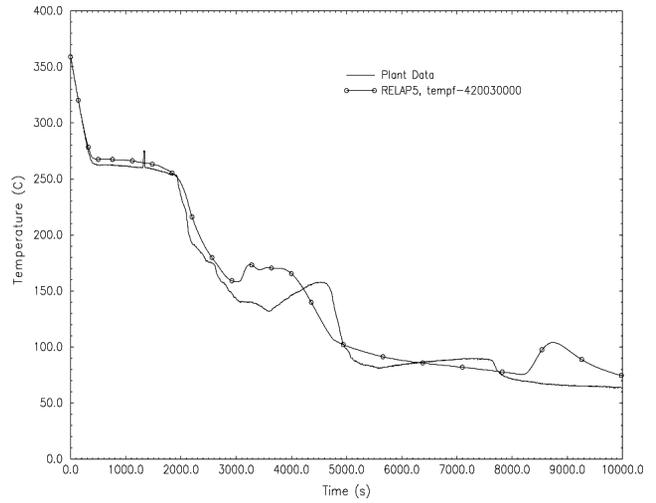


Рис. 14. Температура воды в КД

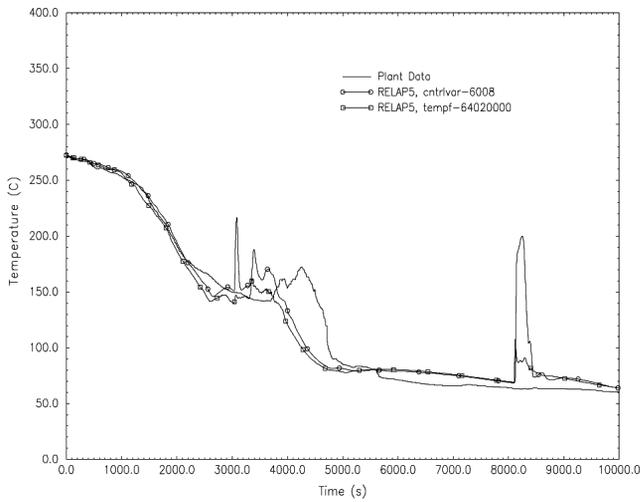


Рис. 12. Температура ГН петли 4, температура на выходе реактора

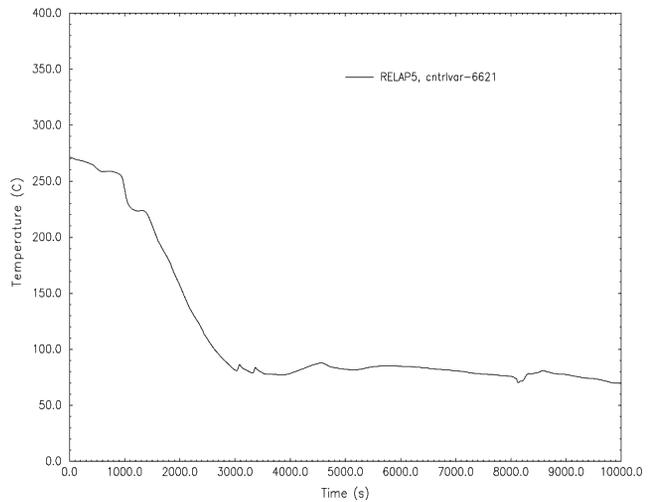


Рис. 15. Максимальная температура оболочек ТВЭЛОВ

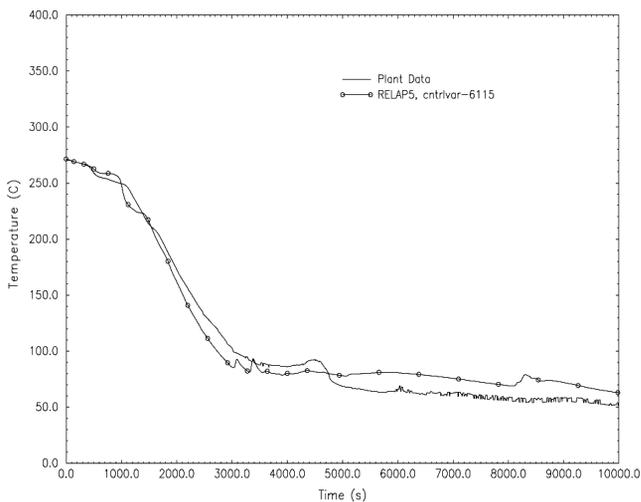


Рис. 13. Температура на выходе из активной зоны

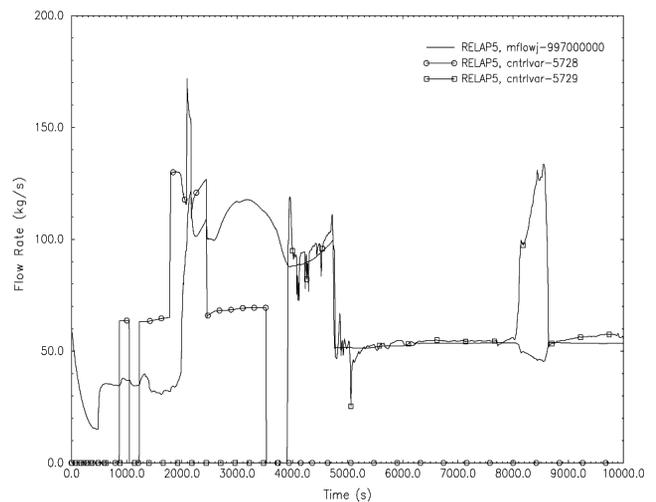


Рис. 16. Расход теплоносителя в течь и расход подачи от САОЗ ВД и НД

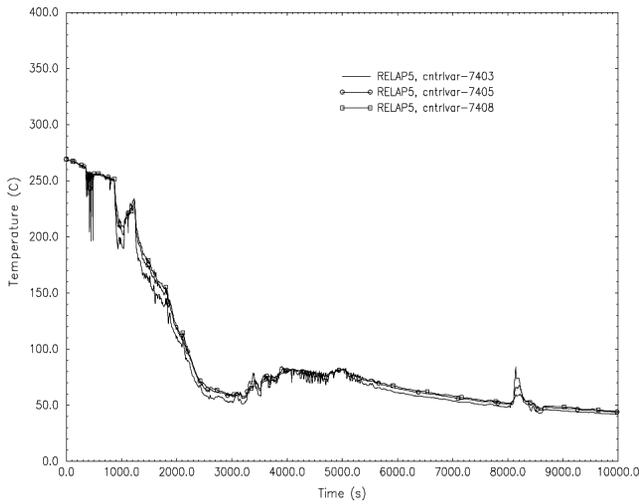


Рис. 17. Минимальная температура жидкости в опусном участке модели реактора на уровне сварных швов № 5, № 4 и № 3

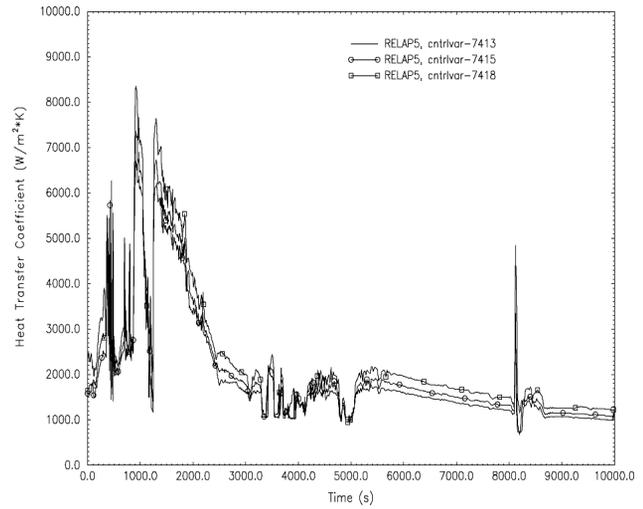


Рис. 18. Максимальный коэффициент теплоотдачи от жидкости к корпусу на уровне сварных швов № 5, № 4 и № 3

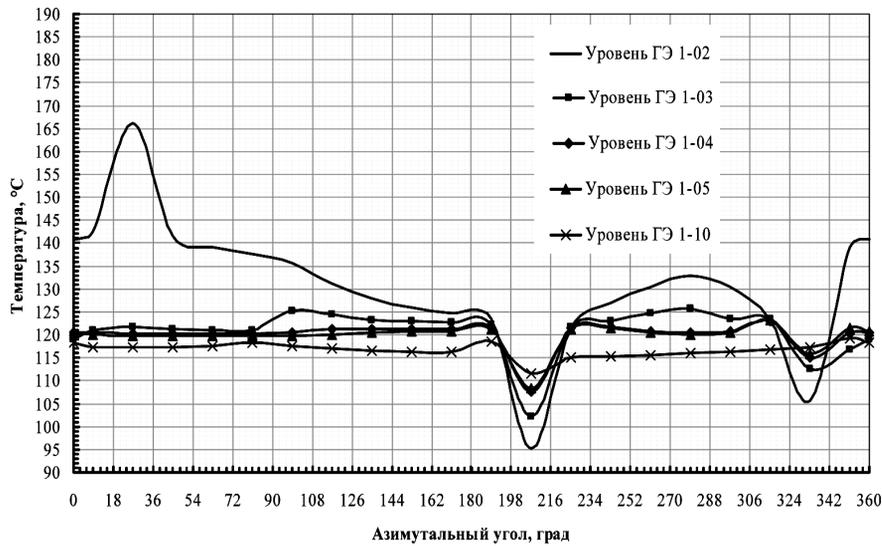


Рис. 19. Профиль температур опусного участка на 2100 с

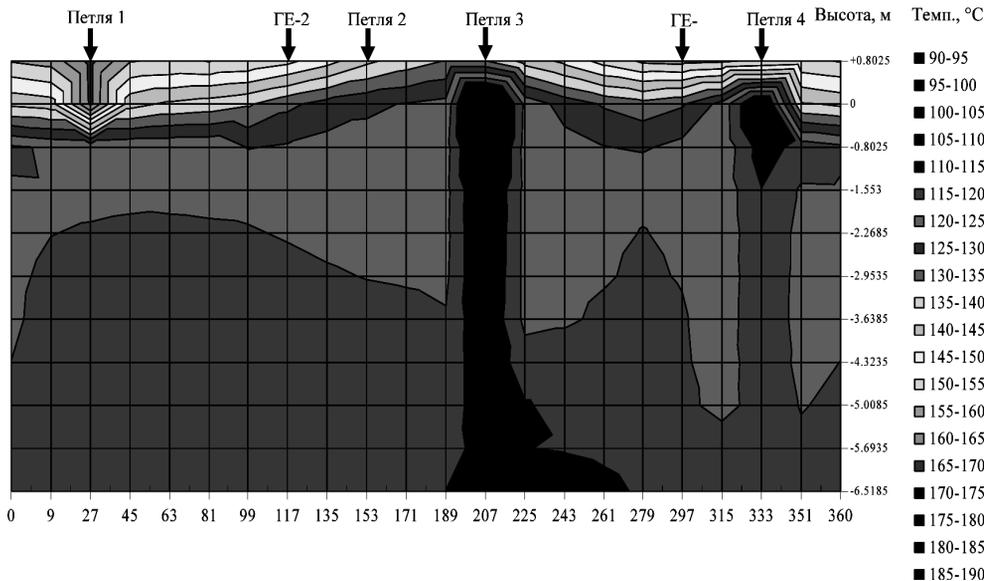


Рис. 20. Диаграмма распределения температур опусного участка на 2100 с

Результаты проведенного сравнительного анализа представлены в табл. 5 в виде кодов соответствия параметров на выбранных временных интервалах.

В табл. 6 приводится информация по средним кодам для каждого интервала.

В интервале 0–2000 с расчета соответствие является отличным и хорошим, до 3000 с — удовлетворительным. Интервал 3000–5000 с самый сложный для моделирования, когда температура первого контура менее 100 °С и циркуляция в петлях РУ не может быть адекватно

Таблица 5. Таблица удовлетворения критериев приемлемости валидации по интервалам расчетного анализа (коды соответствия)

Параметр	Временной диапазон, с					
	0–300	300–500	500–2000	2000–3000	3000–5000	5000–10000
	Код соответствия					
Давление на выходе из реактора	5	4	4	4	4	5
Уровень в КД YP10L06 (для блокировки YPF02)	4	3	—	—	—	—
Минимальный запас до насыщения в горячих нитках	5	5	4	1	1	1
Запас до насыщения на выходе из активной зоны	5	5	4	4	4	4
Температура в холодной нитке петли 1	5	5	2	2	2	3
Температура в холодной нитке петли 2	5	4	1	1	1	1
Температура в холодной нитке петли 3	5	4	1	1	1	1
Температура в холодной нитке петли 4	5	5	2	2	3	3
Температура в горячей нитке петли 1	5	5	4	1	2	3
Температура в горячей нитке петли 2	5	5	4	1	1	1
Температура в горячей нитке петли 3	5	5	4	1	1	1
Температура в горячей нитке петли 4	5	5	5	4	2	4
Температура на выходе из активной зоны	5	5	4	4	4	4
Температура под крышкой реактора	4	4	4	4	2	2
Температура воды в КД	5	5	5	4	4	4
Температура корпуса реактора	4	4	4	4	4	4
Среднее значение кода соответствия	4,76	4,69	4	3,31	2,67	2,97

Таблица 6. Результирующая таблица удовлетворения критериев приемлемости валидации по интервалам расчетного анализа (коды соответствия)

Интервал, с	Код соответствия	Критерий приемлемости
0–300	4,76	Отличное, хорошее
300–500	4,69	Отличное, хорошее
500–2000	4	Хорошее
2000–3000	3,31	Хорошее, удовлетворительное
3000–5000	2,67	Удовлетворительное, минимальное
5000–10000	2,97	Удовлетворительное

смоделирована при помощи одномерной модели холодных и горячих ниток. На данном интервале соответствие удовлетворительное и минимальное. После 5000 с первый контур охлажден и давление стабилизировано, поэтому соответствие параметров становится удовлетворительным и точность моделирования возрастает. В целом наблюдается ожидаемое снижение точности моделирования в зависимости от времени переходного процесса.

Оценка температуры на входе в реактор и выходе активной зоны указывает на то, что принятые в расчетном анализе предположения и конфигурация модели позволяют обеспечить подачу более холодной воды в опускной участок реактора по сравнению с измеренными величинами за счет отсутствия перемешивания в петлях РУ и увеличенной расходной характеристики ПК КД по воде. Данный подход является менее благоприятным с точки зрения термошока корпуса реактора и поэтому приемлем.

Давление первого контура моделируется достаточно хорошо на всем интервале расчета. Температуры петель РУ (холодных и горячих ниток) при низких скоростях циркуляции могут быть оценены по температурам объемов модели на входе в реактор и на выходе реактора. Сравнение показывает в основном хорошее и удовлетворительное соответствие этих параметров температурам датчиков петель. Более того, можно утверждать: в реальной ситуации со снижением скорости циркуляции оператор зарегистрирует изменение температур холодных ниток при подаче САОЗ ВД достаточно своевременно за счет улучшения перемешивания в холодных нитках, что положительно сказывается на определении и диагностировании ситуации оператором.

## Выводы

Модель адекватно моделирует теплогидравлические параметры первого контура, важные для оценки термошока корпуса реактора при течи первого контура из парового пространства КД. Течь из парового пространства КД является аналогом течи из горячей нитки. При начале ИС с номинальной мощности расхолаживание ожидается менее динамичным за счет более высокого энерговыделения в активной зоне. Несмотря на минимальное или неудовлетворительное соответствие некоторых параметров, температуры в опускном участке, судя по температуре на выходе активной зоны, моделируются приемлемо и могут быть при необходимости ограничены снизу введением дополнительных консервативных предположений по граничным условиям систем. После сравнения результатов расчета с тестами также определено, что стратификация в холодных нитках модели и недостатки моделирования циркуляции в ГЦТ слабо влияют на изменение температуры в опускном участке реактора при данном подходе к моделированию.

## Список литературы

1. Проект углубленного анализа безопасности энергоблока № 5 Запорожской АЭС. Модификация расчетной модели ЯППУ для кода RELAP5/MOD3.2. Описание расчетной модели, 10007DL11R / ЗАО «ЭИС». — 2001.
2. Корректировка и обновление ВАБ энергоблока № 5 ЗАЭС. Описание модифицированной расчетной модели RELAP и набор входных данных для кода RELAP5/mod 3.2 EP94-2003.110.ОД.2, Ревизия 2 / ООО «Энергориск». — 2003.

3. Адаптация вероятностного анализа безопасности блока № 5 ЗАЭС, разработанного в рамках ОАБ, для внедрения риск-ориентированных подходов при эксплуатации энергоблока и реализации приложений РОП. Описание модифицированной расчетной модели RELAP и набор исходных данных для кода RELAP5/mod3.2. — ЛИП МЦЯБ, 2004.

4. Воробьев, Ю. Ю. Теплогидравлическая модель реактора ВВЭР-1000 для получения граничных условий для оценки сопротивления хрупкому разрушению с использованием компьютерного кода RELAP5/MOD3.2 / Ю. Ю. Воробьев, О. Р. Кочарьянц // Ядерна та радіаційна безпека. — 2011. — № 2(50). — С. 13–19.

5. Technical Basis for Revision of the Pressurized Thermal Shock (PTS) Screening Limit in the PTS Rule (10 CFR 50.61) // NUREG-1806, Vol. 1. Summary Report. — 2007.

6. Техническое обоснование безопасности сооружения и эксплуатации АЭС. Запорожская АЭС. Энергоблок № 5. Проект / Атомэнергопроект. — 1991.

7. Технологический регламент безопасной эксплуатации энергоблока № 3 Ривненской АЭС. 3-Р-РАЭС. — 2009.

8. Отчет о расследовании нарушения в работе РАЭС. Незакрытие главного предохранительного клапана ИПУ КД УР21S01 во время плановой проверки работоспособности реальным повышением давления в первом контуре перед пуском энергоблока № 3 после ППР из-за подклинивания в седле золотника импульсного клапана УР21S04 после его открытия. Отчет № 3 РОВ-П07-002–09-09Д / ОП РАЭС. — 2009.

9. Архив СВРК, архив ИВС незакрытия главного предохранительного клапана ИПУ КД, РАЭС-3 / ОП РАЭС. — 2009.

10. Guidelines on pressurized thermal shock analysis for WWER Nuclear Power Plants. IAEA-EBP-WWER-08. — 1997.

11. Проект углубленного анализа безопасности энергоблока № 5 Запорожской АЭС. Модификация расчетной модели ЯППУ для кода RELAP5/MOD3.2. Валидационный отчет. 10007DL41R / ЗАО «ЭИС». — 2001.

Надійшла до редакції 31.01.2011.