

## Моделирование переходных процессов для исследовательского реактора ИР-100

Разработана модель реактора ИР-100 для компьютерного кода RELAP5/MOD3.3 с точечной кинетикой. Выполнена валидация модели для стационарного состояния (работа на мощности). Проведены расчеты различных течей и реактивной аварии с выбросом стержня системы аварийной защиты (СУЗ). Результат расчета течи с неполным осушением активной зоны показал возможность расплавления твэлов. Модель может применяться для анализа безопасности исследовательского реактора ИР-100.

**Ключевые слова:** ИР-100, расчетная модель, реактивная авария, течь, компьютерная модель, расчетный код, валидация.

Ю. Ю. Воробйов, С. Е. Яновський

### Моделювання перехідних процесів для дослідницького реактора ІР-100

Розроблено модель реактора ІР-100 для комп'ютерного коду RELAP5/MOD3.3 із точковою кінетикою. Виконано валідацію моделі для стаціонарного стану (робота на потужності). Проведено розрахунки теч та реактивної аварії з викидом стержня системи аварійного захисту. Результат розрахунку течі з неповним осушенням активної зони показав можливість розплавлення твелів. Модель може застосовуватися для аналізу безпеки дослідницького реактора ІР-100.

**Ключові слова:** валідація, ІР-100, розрахункова модель, реактивна аварія, теча, комп'ютерна модель, розрахунковий код, валідація.

В статье предложена модель для исследования теплогидравлических и нейтронно-физических характеристик (параметров) реактора ИР-100 в процессе аварий. Интегральные компьютерные модели реакторных установок (РУ) для расчетных теплогидравлических кодов, например RELAP5/MOD3.3, позволяют моделировать (симулировать) поведение параметров (температура топлива, температура теплоносителя) со временем. Это актуально для исследования переходных процессов в установках исследовательских реакторов, для которых, как правило, при анализе аварий не рассматриваются (рассматриваются только качественно) случаи с возможными локальными (по времени) нарушениями пределов безопасной эксплуатации.

Расчетная модель реактора ИР-100 для кода RELAP5/MOD3.3 [2] представляет собой контур циркуляции, в котором реализован нагрев от активной зоны, охлаждение теплообменником и окружающей бак реактора средой.

**Аварии на исследовательской установке.** По результатам проверочных расчетов, выполненных в рамках экспертизы отчета по переоценке безопасности [5] для установки ИР-100, можно сделать вывод, что при естественной конвекции воздуха внутри бака (при аварии с полным осушением) температура активной зоны реактора не превысит 250 °С, и разрушения твэлов не произойдет [3].

К тяжелой аварии могут привести резкое введение положительной реактивности, а также течи или случаи, вызывающие резкое ухудшение теплоотвода от активной зоны. При быстром введении положительной реактивности опасность представляет рост давления внутри бака в результате вскипания теплоносителя, из-за чего может подняться крышка реактора.

Анализ возможных аварийных последовательностей показал, что при частичной потере теплоносителя (до уровня низа активной зоны) возможность циркуляции воздуха внутри бака, которым можно охлаждать активную зону путем естественной конвекции, будет потеряна.

**Модель реактора.** Модель реактора состоит из двух основных гидравлических элементов, или объемов (рис. 1): внутренней части бака с активной зоной, отделенной обечайкой (элемент 1), и объема снаружи обечайки, где в его верхней части расположен теплообменник (элемент 2). В модели имеется связь с объемом постоянного давления, моделирующего вентиляцию бака.

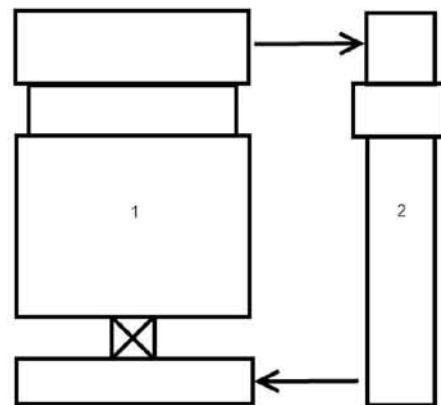


Рис. 1. Нодализация модели ИР-100

Характеристики гидравлических элементов модели (объемы и высотные отметки) соответствуют объемам и высотным отметкам реальной установки ИР-100, полученным по материалам ТОО ИР-100 [1].

**Настройка модели.** Настройка модели осуществлялась по данным ТОБ. В контуре ИР-100 естественная циркуляция теплоносителя, и основной привязкой по настройке являлась температура на выходе из активной зоны 55 °С при мощности 200 кВт (результаты стационарного расчета).

В модели реализована точечная кинетика реактора с обратной связью по температуре топлива и температуре теплоносителя.

Активная зона разбита на 10 равных аксиальных слоев, которые моделируются ее (активной зоны) тепловой структурой.

Коэффициенты реактивности по температуре топлива и по температуре теплоносителя составляют соответственно  $\alpha_T = -4,2 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}}$  [1, 5] и  $\alpha_{\text{ТТ}} = -3,0 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}}$  [1, 5].

Остаточное энерговыделение реактора рассчитывается кодом автоматически по стандарту ANS79-1.

В модели использован аксиальный профиль энерговыделения по высоте активной зоны [1]:

Номер слоя по высоте	Коэффициент относительного энерговыделения $K_z$
1	0,0732
2	0,0831
3	0,1032
4	0,117
5	0,1235
6	0,1235
7	0,117
8	0,1032
9	0,0831
10	0,0732

**Реактивная авария.** Данный расчетный анализ предполагал оценку характеристик всплеска мощности при резком вводе положительной реактивности в активной зоне реактора (аналог выброса регулирующих стержней).

Цель расчета — определение поведения мощности реактора ИР-100 и температуры топлива. При быстром вводе положительной реактивности возможен рост давления в баке за счет быстрого роста мощности реактора. Рост давления может привести к поднятию чугунной крышки,

накрывающей бак, толщиной 45 см [1]. Для этого требуется выполнение условия

$$P_{\text{п.к}} \geq P_{\text{к}},$$

где  $P_{\text{п.к}}$  — давление под крышкой бака;  $P_{\text{к}}$  — давление, оказываемое крышкой:

$$P_{\text{к}} = \frac{m_{\text{к}}g}{S_{\text{к}}} + P_{\text{атм}} = \frac{V_{\text{к}}\rho_{\text{к}}g}{S_{\text{к}}} + P_{\text{атм}} = 1,33 \cdot 10^5;$$

здесь  $m_{\text{к}}$  — масса крышки;  $g$  — ускорение свободного падения;  $S_{\text{к}}$  — площадь крышки;  $V_{\text{к}}$  — объем крышки;  $\rho_{\text{к}}$  — плотность материала крышки (чугун);  $P_{\text{атм}}$  — атмосферное давление.

Результаты расчетного моделирования показали, что при введении положительной реактивности величиной  $2\beta$  в активную зону реактора ИР-100 за 0,1 секунды при начальной мощности 200 кВт наблюдается резкий разгон на быстрых нейтронах. Уже к 0,108 секунды мощность достигает своего максимума и составляет около  $6,72 \cdot 10^8$  Вт, или  $3360 N_{\text{ном}}$ . После разогрева топлива из-за эффекта Доплера мощность к 1,0 секунде снижается до  $5,21 \cdot 10^6$  Вт, или приблизительно до  $26 N_{\text{ном}}$ . Температура оболочек твэлов за момент всплеска повышается до 450 °С (рис. 2—4). На рис. 5 видно, как происходит вскипание воды в активной зоне, однако это не приводит к заметному росту давления внутри бака из-за наличия под крышкой прослойки воздуха и вентиляционного канала.

**Течь с неполным оголением активной зоны.** В случае полного опустошения бака ИР-100 охлаждение активной зоны происходит за счет естественной конвекции воздуха в баке, и температура оболочек твэлов, как показал расчет, достигает 150 °С [3]. Но если осушение пройдет до низа активной зоны, то, согласно особенностям конструкции ИР-100, вода перекроет подвод воздуха, и циркуляции в баке (конвекции) не будет. Гидрозатвор, который образуется в нижней части бака, не даст воздуху поступать под активную зону. С боков активной зоны подвода воздуха не будет из-за наличия отражателя. Таким образом, воздух сможет попасть в активную зону только сверху.

Результаты переходного процесса аварии с частичным осушением активной зоны приведены на рис. 6—9.

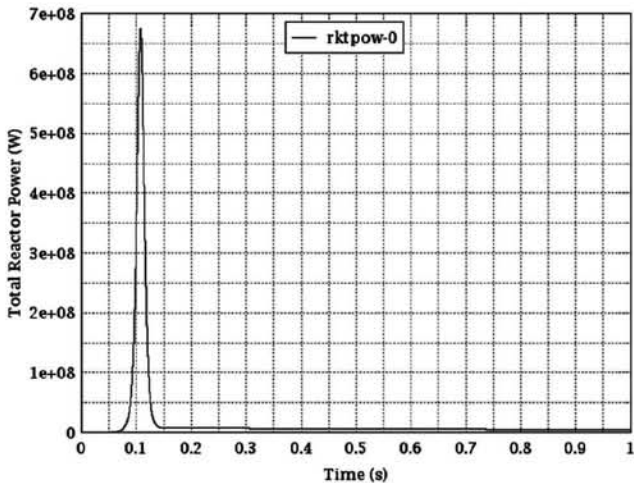


Рис. 2. Мощность реактора при вводе реактивности  $2\beta$

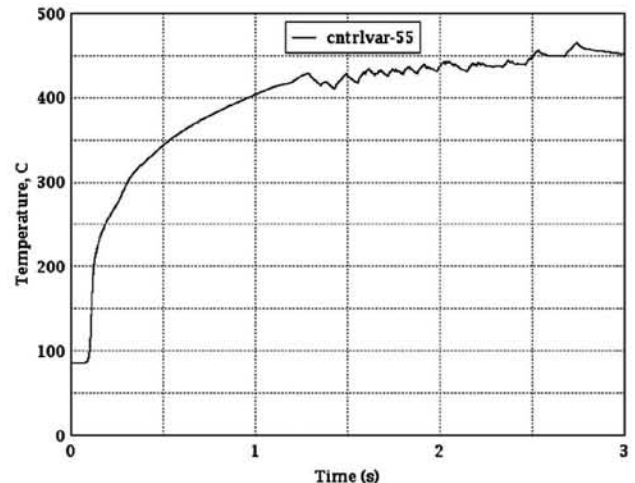


Рис. 3. Температура оболочек твэлов при вводе реактивности  $2\beta$

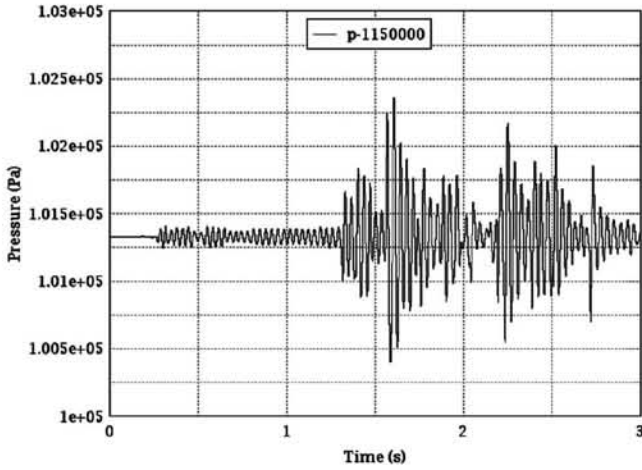


Рис. 4. Давление под крышкой бака при вводе реактивности  $2\beta$

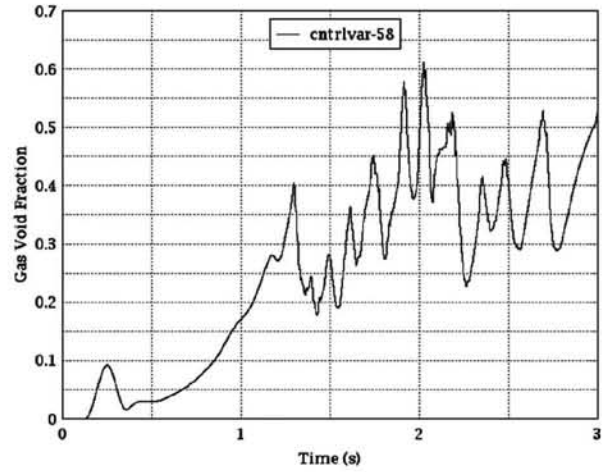


Рис. 5. Доля пара в активной зоне при вводе реактивности  $2\beta$

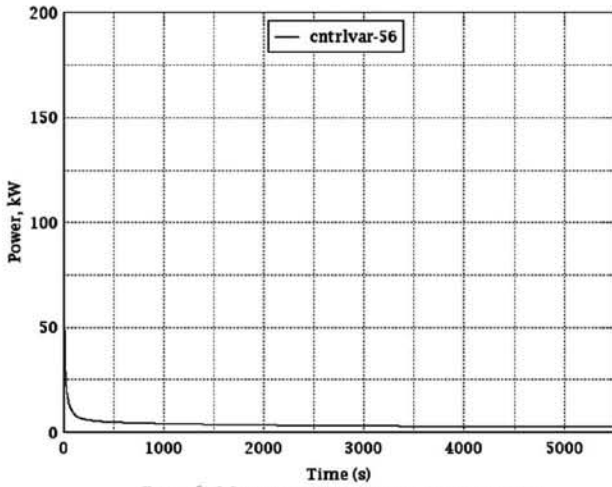


Рис. 6. Мощность реактора при аварии с неполным осушением

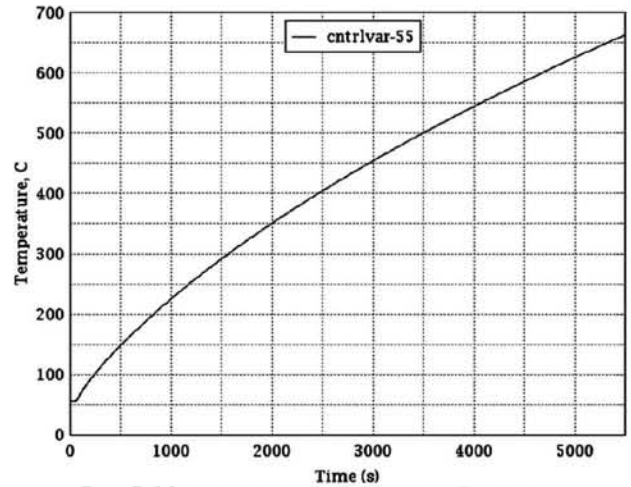


Рис. 7. Максимальная температура оболочек твэлов при аварии с неполным осушением

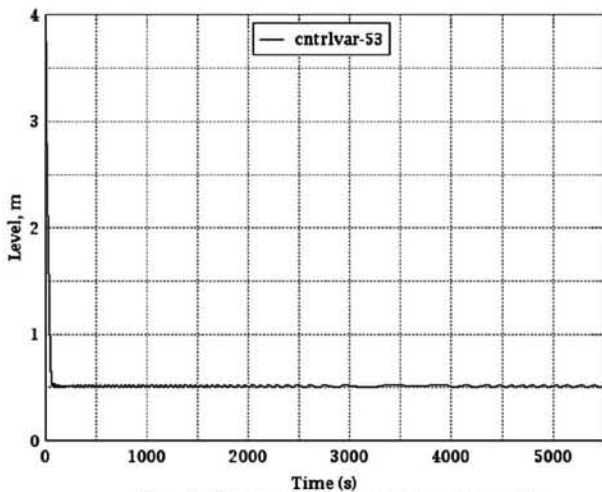


Рис. 8. Уровень воды в баке при аварии с неполным осушением

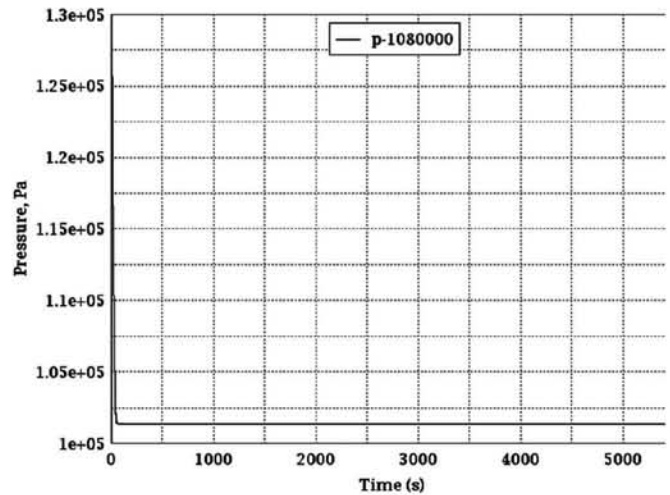


Рис. 9. Давление над активной зоной при аварии с неполным осушением

Моделируется течь в баке через отверстие Ду 100 мм в боковой стенке, на уровне низа активной зоны. После снижения уровня в баке срабатывает аварийная защита, и реактор переходит в подкритическое состояние. При снижении уровня воды до высотной отметки отверстия течи отток воды из бака прекращается. Из-за отсутствия конвекции внутри бака начинается рост температуры оболочек твэлов. Спустя приблизительно 5500 с максимальная температура оболочки достигает 658 °С, что свидетельствует о плавлении твэлов и начале разрушения активной зоны.

Полученные результаты по температуре топлива достаточно консервативны, так как в модели нельзя учесть конвекцию потоков внутри объема активной зоны. В такой ситуации активная зона будет контактировать с воздухом только в верхней части; имеющая место слабая конвекция не учитывается в моделировании. Подтверждение ухудшения теплоотвода при неполном осушении активной зоны доказывает возможность крайне негативных последствий аварии. Для более точного моделирования необходимо учесть попадание воздуха из верхней части, создав в модели разбиение активной зоны в радиальном направлении.

#### Выводы

В целом моделирование аварий на исследовательской установке ИР-100 является возможным, на что указывают данные проведенного расчетного анализа. Однако отсутствие симуляции (моделирования) движения потоков воздуха внутри активной зоны, как следствие «монообъемности», приводит к заведомо консервативным результатам.

Моделировать эффекты при неполном осушении необходимо в квазитрехмерном приближении, с разбиением активной зоны на более мелкие объемы как в радиальном, так и азимутальном направлениях. Подобное моделирование можно провести как в RELAP5/MOD3.3, так и в более современном расчетном коде TRACE с трехмерной геометрией элементов.

Результаты с неполным осушением активной зоны служат поводом к более углубленному анализу безопасности реактора ИР-100.

#### Список использованной литературы

1. Техническое обоснование безопасности исследовательского реактора ИР-100: Отчет / СНИЯЭиП. — Севастополь, 2013.
2. RELAP5/MOD3.3 CODE MANUAL VOLUME II: APPENDIX A. INPUT REQUIREMENTS, Nuclear Safety Analysis Division, January 2002 Information Systems Laboratories, Inc. Rockville, Maryland Idaho Falls, Idaho Prepared for the Division of Systems Research Office of Nuclear Regulatory Research U. S. Nuclear Regulatory Commission Washington, DC 20555.
3. Отчет о проведении государственной экспертизы ядерной и радиационной безопасности материалов: Отчет по переоценке безопасности исследовательского реактора ИР-100 СНУЯЭиП / ГНТЦ ЯРБ. — К., 2013.
4. Воробьев Ю. Ю. Валидация теплогидравлической модели реактора ВВЭР-1000 для компьютерного кода RELAP5/MOD3.2 по оценке условий термшока корпуса реактора / Ю. Ю. Воробьев, О. Р. Кочарьянц // Ядерна та радіаційна безпека. — 2011. — № 3 (51). — С. 29–37.
5. Отчет по переоценке безопасности исследовательского реактора ИР-100 СНУЯЭиП / СНУЯЭиП. — Севастополь, 2013.

#### References

1. Research reactor IR-100 safety analysis: Report / SNIYaEiP. — Sevastopol, 2013.
2. RELAP5/MOD3.3 CODE MANUAL VOLUME II: APPENDIX A. INPUT REQUIREMENTS, Nuclear Safety Analysis Division, January 2002 Information Systems Laboratories, Inc. Rockville, Maryland Idaho Falls, Idaho Prepared for the Division of Systems Research Office of Nuclear Regulatory Research US Nuclear Regulatory Commission Washington, DC 20555.
3. Nuclear and radiation safety state expert report: SNUNEI research reactor IR-100 safety reassessment report / SSTC NRS. — Kiev, 2013.
4. Vorobyov Y. Y. Validation of the thermal-hydraulic model VVER-1000 in computer code RELAP5/MOD3.2 assessment thermal shock conditions of the reactor vessel / Y. Y. Vorobyov, O. R. Kocharyants / Nuclear and Radiation Safety. — 2011. — № 3 (51). — С. 29–37.
5. Research reactor IR-100 safety analysis reassessment report of SNIYaEiP / SNIYaEiP. — Sevastopol, 2013.

Отримано 22.05.2014.