

# ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, ВКЛЮЧАЯ ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ЭКСПЛУАТАЦИЮ И ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ (05.14.03)

УДК 621.039.743.621

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-2-19-25

## Моделирование обезвоживания открытых систем с помощью программы *RELAP5*

Е.Ю. Брагин, А.О. Гольцев, А.В. Ильин, А.М. Осипов, С.В. Прохоренков, А.К. Смирнова

Существует множество программных средств, хорошо зарекомендовавших себя для проведения расчетного анализа в обосновании безопасности объектов использования атомной энергии. Одним из таких является расчетный код для улучшенной оценки безопасности *RELAP5*. Изначально его использование ограничивалось расчетами водо-водяных аппаратов, но широкие возможности кода и устойчивые алгоритмы решения гидравлических и теплофизических задач позволяют значительно расширить область его применения. Подобное использование расчетного кода должно быть обосновано как теоретически, так и с помощью верификации с соответствующими экспериментальными данными.

Приведены результаты расчетного моделирования по программе *RELAP5*. Представлено сравнение расчетных и экспериментальных данных по нагреву системы с низкими тепловыми потоками. Результаты расчета по программе *RELAP5* сопоставлены с результатами двух экспериментов.

В первом эксперименте выполнен нагрев воды в открытом теплоизолированном сосуде. За счет испарения уровень воды в сосуде снижался, при этом кипение воды не наблюдалось. Давление в эксперименте — атмосферное. Как только уровень воды снижался ниже обогреваемой части теплового элемента, происходил резкий рост температуры его стенки. Классический подход к моделированию по программе *RELAP5* показал существенное расхождение экспериментальных и расчетных данных. После корректировки расчетной модели получено более адекватное совпадение расчетных и экспериментальных результатов.

Второй эксперимент заключался в нагреве обезвоженной системы при различной мощности нагревателя. При ступенчатом наборе мощности нагревателя соответствующим образом менялась и его температура. По результатам сравнения расчетных и экспериментальных данных продемонстрировано существенное влияние механизма аксиальной теплопроводности на процесс разогрева частично обезвоженного нагревательного элемента и предложен способ моделирования продольного перетока тепла вдоль теплового элемента в расчетах по программе *RELAP5*. Показана возможность применения *RELAP5* для моделирования обезвоженной системы. Изложенные верификационные материалы содержат рекомендации по построению расчетных моделей систем с низкими тепловыми потоками, которыми могут служить бассейны выдержки отработавшего топлива на атомных электрических станциях.

**Ключевые слова:** *RELAP5*, тепловой поток, нагрев, испарение, теплопроводность, эксперимент.

**Для цитирования:** Брагин Е.Ю., Гольцев А.О., Ильин А.В., Осипов А.М., Прохоренков С.В., Смирнова А.К. Моделирование обезвоживания открытых систем с помощью программы *RELAP5* // Вестник МЭИ. 2020. № 2. С. 19—25. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-2-19-25.

## Modeling the Dewatering of Open Systems Using the *RELAP5* Code

E. Yu. Bragin, A. O. Gol'tsev, A. V. Il'yin, A. M. Osipov, S. V. Prokhorenkov, A. K. Smirnova

At present, there are many software tools that have positively proven themselves for carrying out computational analysis within the framework of assessing the safety of nuclear power utilization facilities. The *RELAP5* code, which is intended for carrying out improved assessment of safety, is one of such tools. Initially, its use was limited to a numerical analysis of water-heated water-cooled apparatuses. At the same time, owing to extensive capabilities of the code and stable algorithms for solving hydraulic and thermophysical problems, its application field can be made significantly broader. However, the validity of such broadening should be justified both theoretically and by verification against relevant experimental data.

The computational modeling results obtained using the *RELAP5* code are given. A comparison between the calculated and experimental data on heating a system operating with low heat fluxes is presented. The results obtained from computations using the *RELAP5* code are compared with the results of two experiments.

In the first experiment, which was carried out at atmospheric pressure, water was heated in an open thermally insulated vessel. Due to evaporation, the water level in the vessel decreased, but water boiling did not occur. As soon as the water level dropped below the thermal element heated part, the element's wall temperature showed a sharp increase. The classical approach that was applied to modeling using the *RELAP5* code showed a significant discrepancy between the experimental and calculated data. After modifying the computational model, a more adequate agreement between the calculated and experimental results was obtained.

In the second experiment, the dewatered system was heated at different heater power levels. With increasing the heater power in successive steps, its temperature changed accordingly. Based on the results from comparison of the calculated and experimental data, it has been shown that the axial heat conduction mechanism has a significant effect on the heating of a partially dewatered heating element, and a method for modeling the longitudinal heat flow along the thermal element in the computations carried out using the *RELAP5* code is proposed. The possibility of using the *RELAP5* code for simulating a dewatered system has been demonstrated.

The verification materials presented in the article contain recommendations for constructing the analysis models of systems operating with low heat fluxes, e.g., spent fuel pools at nuclear power plants.

*Key words:* *RELAP5*, heat flux, heating, evaporation, thermal conductivity, experiment.

*For citation:* Bragin E.Yu., Gol'tsev A.O., Il'yin A.V., Osipov A.M., Prokhorenkov S.V., Smirnova A.K. Modeling the Dewatering of Open Systems Using the *RELAP5* Code. Bulletin of MPEI. 2020;2:19—25. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-2-19-25.

## Введение

Любое изучение изменения состояния системы начинается с выявления особенностей объекта исследования и определения физических законов, которым он подчиняется. В значительном большинстве случаев развитие всех взаимодействий можно свести к формулировке трех основных законов сохранения: энергии, массы, количества движения. В зависимости от того, какой вид изменения внутреннего состояния системы интересует исследователя, он использует тот или иной набор замыкающих соотношений для формирования окончательной записи уравнений, определяющих поведение исследуемого объекта.

Такой подход к моделированию используется со времен открытия законов сохранения, реализован в неслучайном количестве программных средств и в каждом конкретном случае в зависимости от набора замыкающих соотношений, имеет свою ограниченную область применения.

Некоторые программные средства обладают настолько устойчивыми алгоритмами, что позволяют расширить область применения путем нестандартного использования набора штатных возможностей. В основном это справедливо для программных средств, хорошо зарекомендовавших себя на протяжении многолетней стабильной работы. Одним из таких продуктов является программа *RELAP5* [1].

Она хорошо зарекомендовала себя при проведении теплогидравлических расчетов: нестационарных, переходных и аварийных режимов реакторных установок с водяным теплоносителем. Ее область применения ограничена режимами, не связанными с тяжелым повреждением активной зоны, деформацией элементов конструкции, оказывающих существенное влияние на протекание теплогидравлических процессов.

Допустимые значения параметров в области применения программы определяются следующими диапазонами:

давление теплоносителя, МПа ..... 0,1...22,1  
температуры, °С:  
теплоносителя ..... 10...1200  
оболочки ТВЭЛ ..... < 1200  
температура топлива ..... меньше температуры плавления.

При анализе режимов, выходящих за пределы области применения программы, требуются проведение специальной оценки погрешности и результатов расчета или обоснование их консервативности.

В публикации [2] рассмотрена возможность выполнения анализа аварийных ситуаций на реакторах с натриевым теплоносителем в среде расчетного комплекса *RELAP5* в то время, как в программе отсутствует учет в жидкометаллического теплоносителя.

Для установки РИТМ.200 [3], разработанной АО «ОКБМ Африкантов» в [4] рамках кросс-верификации приведены результаты сравнения расчетов по программам *KOPCAP/BR* и *RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4* исходного события, связанного с разрывом трубопровода первого контура.

Современные модификации кода *RELAP (TRAC/RELAP Advanced Computational Engine (TRACE))* используются даже для расчета высокотемпературных жидкосольевых установок [5, 6]

Ко всему прочему, не стоит упускать тот момент, что применяемые в инженерных кодах корреляции несовершенны и ограничены своей областью применения, а в некоторых случаях могут быть улучшены [7].

Настоящая работа посвящена результатам решения двух задач с помощью программы *RELAP5*, формально выходящих за рамки ее паспортных характеристик. Приложение задач может быть использовано в рамках анализа аварий на хранилищах ОЯТ бассейнового типа. Выполнено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными [8, 9].

## Задача № 1.

### Нагрев воды в сосуде при атмосферном давлении

Моделируемый объект представляет собой цилиндрический теплоизолированный сосуд диаметром 100 мм,

высотой 350 мм с толщиной стенок 0,6 мм с открытым верхом (рис. 1). В качестве нагревателя использован термоэлектрический нагреватель диаметром 6 мм, длиной 300 мм, выполненный из коррозионностойкой стали с толщиной стенки 0,25 мм, расположенный на оси сосуда. Нижний конец нагревателя находился на высоте 5 мм от дна сосуда. Температуру нагревателя измеряли в точках 1 — 4. Перед началом эксперимента сосуд заполняли дистиллированной водой. После включения нагревателя происходили нагрев воды и снижение уровня за счет испарения.

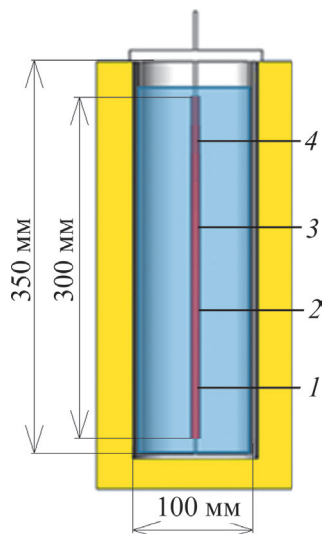


Рис. 1. Схема установки:  
1 — 4 — контрольные точки

При моделировании эксперимента по программе RELAP5 (рис. 2) экспериментальный сосуд представлен двумя вертикальными концентрическими каналами. Объем сосуда моделировали двумя параллельными вертикальными каналами, разбитыми на 35 элементов (каналы 1 и 11), с боковым соединением (Crossflow) для создания области естественной конвекции теплоносителя. Объем лабораторного помещения ограничен тремя вертикальными каналами, разбитыми на 5 элементов (каналы 2, 22, 222). В качестве граничных условий (ГУ) задано давление в системе (ГУ 801 и 800 на высоту столба воздуха).

Тепловые структуры представлены нагревателем, стенками сосуда, стенами и потолком комнаты. При осушении учитывали теплообмен излучением между всеми элементами системы. Расчет угловых коэффициентов для моделирования лучистого теплообмена проводили для каждой аксиальной ячейки тепловых структур. Задавали полную матрицу системы излучательных поверхностей. Угловые коэффициенты вычисляли по методу натянутых нитей [10]:

$$\varphi_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{2L} ((ad + cb) - (ab + cd)).$$

Принцип работы метода для модели RELAP5 изображен на рис. 3.

Сравним результаты расчета с экспериментальными данными. Наибольший интерес представляет температура в точках 3, 4 — местах расположения термомпар, ниже которых опускался уровень воды в ходе

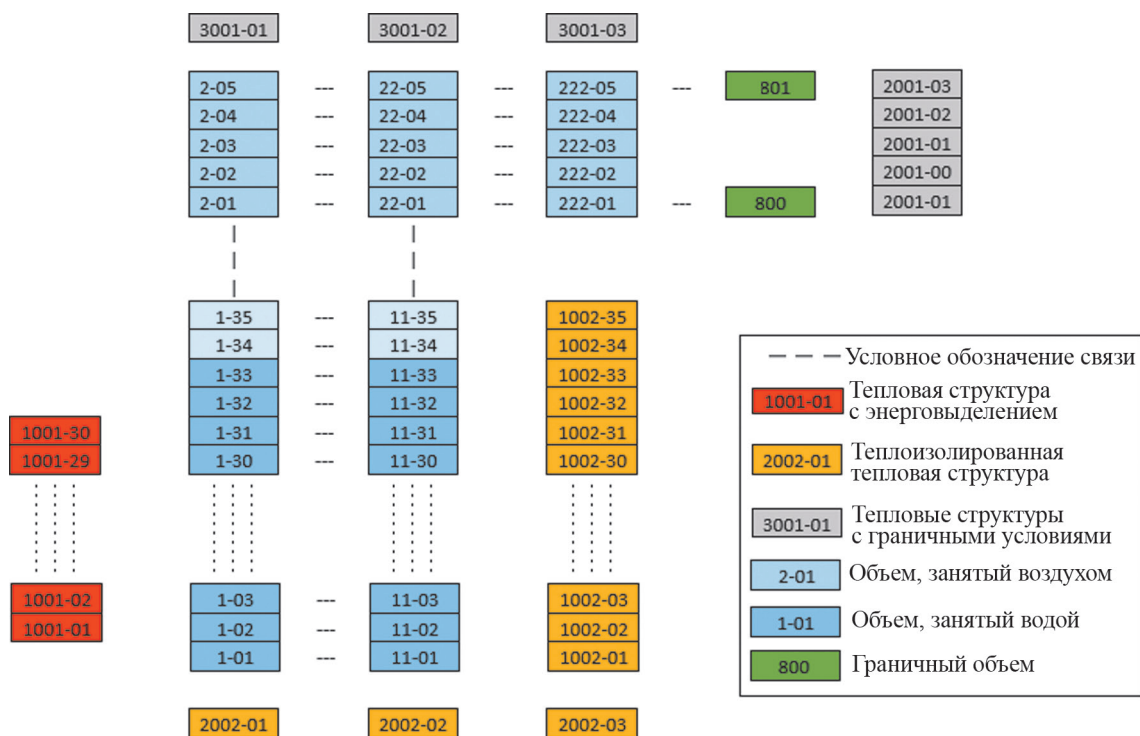


Рис. 2. Нодализационная схема установки для программы RELAP5

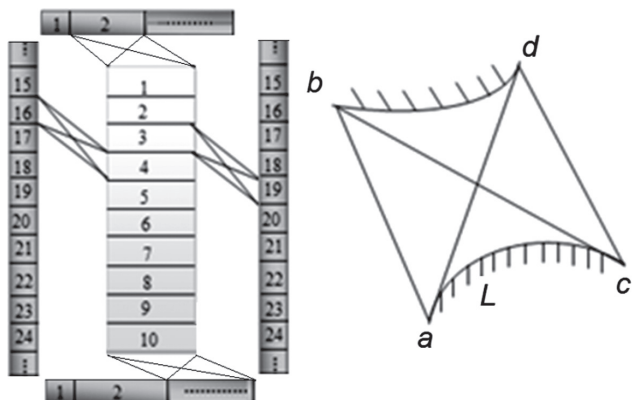
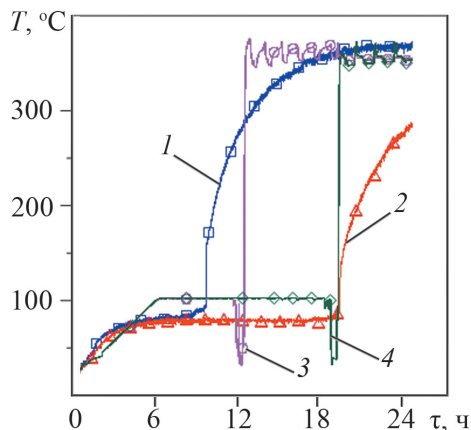


Рис. 3. Схема метода натянутых нитей

эксперимента. В указанных точках термопары нагревателя практически отслеживали изменение температуры воды в сосуде, что соответствовало результатам расчетов. Поскольку режим охлаждения участков нагревателя в местах расположения термопар связан со значением параметров, входящих в диапазон паспортных характеристик *RELAP5*, то анализ показаний термопар 1 и 2 не имеет научного интереса.

На рисунке 4 дано сравнение температуры нагревателя в контрольных точках 3, 4 в эксперименте и при расчете по *RELAP5*. Мощность нагревателя — 52,5 Вт. В расчетах использовано простое представление гидравлических и тепловых элементов. Видно, что результаты сильно отличаются. Анализ данного несоответствия показал, что при моделировании медленного осушения системы с малым энерговыделением важную роль играет аксиальный переток тепла вдоль теплового элемента. В *RELAP5* данный механизм аксиальной теплопроводности в явном виде отсутствует, поэтому, как только в расчете происходило осушение боковой поверхности теплового элемента, скорость изменения температуры в этом месте определяли тепловой инерционностью нодализационного элемента тепловой

Рис. 4. Температура нагревателя в контрольных точках 3, 4 в эксперименте (1, 2) и расчете (3, 4) при обычном моделировании по программе *RELAP5*

структуры (в представленном расчете она приближена к нулю). В эксперименте скорость роста температуры нагревателя при снижении уровня ограничена оттоком тепла к холодному участку нагревателя, находящемуся в воде.

Для учета этого физического явления внесены корректировки в расчетную модель:

- включена опция *Reflood*, учитывающая двумерную модель теплопроводности в пределах одной аксиальной зоны (опция использована только для разбиения аксиальных нод, ее дополнительные возможности в моделировании исследуемого процесса значения не имели), а при медленном снижении уровня воды ограничивающая рост температуры аксиальной ноды теплового элемента при её осушении;

- для отвода тепла к воде от уже осушенных ячеек применен теплообмен излучением между ячейками, находящимися на разном высотном уровне.

Расчет угловых коэффициентов для моделирования лучистого теплообмена проводили для каждой аксиальной ячейки тепловых структур (нагревателя, стенки сосуда, стены помещения, потолок) по методу натянутых нитей [10] с задачей полной матрицы системы излучательных поверхностей.

Результаты расчета после внесения корректировок представлены на рис. 5. Видно, что после доработки расчетной модели имеется хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных по темпу разогрева осушенного нагревателя, однако, моменты начала осушения контрольных точек 4 и 3 отличаются.

На рисунке 6 продемонстрировано снижение уровня воды в эксперименте и при расчете. Видно, что расчетное снижение уровня начинается с некоторым запозданием относительно эксперимента, но идет с более высокой интенсивностью. Объясняется это тем, что в эксперименте уровень снижается за счет испарения жидкости с поверхности, а в расчете — за счет объемного кипения. Температура воды в эксперименте не

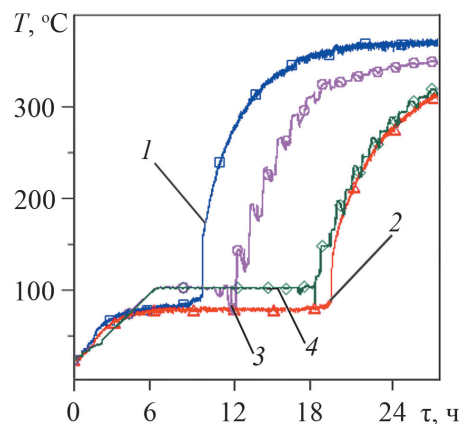


Рис. 5. Температура нагревателя в контрольных точках 3 и 4 в эксперименте (1, 2) и при расчете (3, 4) после корректировки расчетной модели

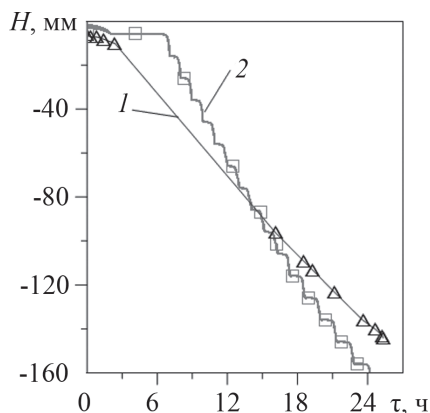


Рис. 6. Уровень воды в эксперименте (1) и при расчете (2)

достигала точки кипения. Такое расхождение расчетных и экспериментальных результатов объясняется отсутствием в *RELAP5* механизмов тепло- и массообмена при испарении с поверхности недогретой до кипения жидкости.

Полученное максимальное значение температуры нагревателя имеет удовлетворительное совпадение опытных и расчетных данных.

Исследована чувствительность расчётной схемы к нодализационному разбиению. Полученный результат показал наличие зависимости от способа аксиального разбиения и отсутствие чувствительности к увеличению числа радиальных зон, а также присутствие слабой зависимости от размеров зоны, контактирующей с нагревателем.

При уменьшении величины аксиальной ячейки снижается амплитуда пульсации температур при осушении теплового элемента. Наиболее оптимальное значение сечения гидравлического элемента, контактирующего с нагревателем, составило 20% от поперечного сечения экспериментального сосуда.

### Задача № 2.

#### Нагрев обезвоженной системы

Рассмотрен нагрев обезвоженной системы, изучаемой в задаче № 1 (см. рис. 1). В ходе эксперимента мощность нагревателя повышали ступенчато, значения рассматриваемых ступеней — 3, 6, 12, 30 и 60 Вт.

Результаты расчета по программе *RELAP5* и экспериментальные данные имеют хорошее совпадение. Расхождение расчетных и опытных значений температур конструктивных элементов лежит в пределах 5 °С (рис. 7). Расхождение имеется только в аксиальном распределении при мощности 60 Вт. Его причина связана с выбранными в расчете приближениями:

- при использовании полной матрицы угловых коэффициентов связана температура всех поверхностей системы, в этом случае неоднородность температурного поля в системе снижается;
- принятый в расчете угловых коэффициентов метод натянутых нитей неточно определяет значение ко-

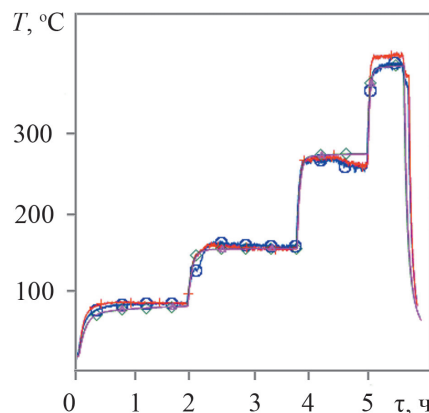


Рис. 7. Температура нагревателя в задаче № 2 в контрольных точках 3 и 4 в эксперименте (+, o) и при расчетах (□, o)

эффициентов излучения для торцевой границы нагревателя;

- существуют неопределенности степени черноты для стен и потолка помещения.

### Итоги моделирования по программе *RELAP5*

В ходе решения поставленных задач с помощью *RELAP5* выявлено, что при моделировании процесса медленного осушения сосуда с водой следует учитывать переток тепла в аксиальном направлении нагревательного элемента.

Для этого при создании модели излучения стоит задавать полную матрицу угловых коэффициентов внутри одного набора поверхностей. Их расчет можно вести по методу натянутых нитей с учетом диагональных просветов. Такой способ моделирования теплообмена излучением позволяет связать поверхности всех тепловых структур и ввести для нагревательного элемента аналог эффективной аксиальной теплопроводности;

Рекомендуется использовать опцию *Reflood*. Медленно осушаемый нагреватель частично находится в воде, и температура его неосушенной части близка к температуре жидкости. Это приводит к аксиальному отводу тепла в сторону ненагретой части теплового элемента. Расчеты, в которых не использовалась *Reflood*, показали, что скорость разогрева в расчете и эксперименте существенно отличалась (в эксперименте разогрев происходил значительно медленнее).

При большой теплоемкости нагреваемого элемента влияние отвода тепла от осушенной части нагревателя к водному объему может быть не так очевидно, как в рассматриваемом примере. При моделировании осушения бассейнов выдержки отработавшего топлива и величине ноды ~ 1 м расчеты не показывают никакого резкого скачка температуры нагревателя (рис. 4). Однако учет аксиальной теплопроводности в математической модели бассейна выдержки отработавшего топлива ведет к существенному изменению результатов моделирования. В этом случае выявить наличие ошибки расчетного моделирования на основании экс-

периментальных данных нет никакой возможности, поскольку такие полномасштабные эксперименты маловероятно, что будут проводиться.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных по двум задачам показало, что:

- расчеты по программе *RELAP5* предсказывают снижение уровня теплоносителя в обогреваемом сосуде, но описывают его как парообразование при кипении жидкости (что противоречит экспериментальным результатам), тогда как физическая природа процесса заключается в испарении жидкости с поверхности за счет разницы парциальных давлений пара при температурах жидкости и окружающего воздуха;

- процесс отвода тепла за счёт испарения с открытой водяной поверхности в системах с малыми тепловыми потоками является определяющим;

- результаты моделирования разогрева обезвоженной системы имеют хорошее соответствие с экспериментальными данными, различимые отличия появляются лишь при увеличении мощности нагревателя на граничных областях модели.

### Литература

1. **Паспорт** программного средства № 409 от 08.12.2016 г. для теплогидравлических расчетов переходных и аварийных режимов реакторных установок РБМК RELAP5/mod3.2. М.: Ростехнадзор, 2016.

2. **Никулин Е.В., Соболев А.В., Волков Ю.В.** Оценка показателей безопасности для реактора типа МБИР с помощью расчетного кода RELAP // Известия высших учебных заведений. Серия «Ядерная энергетика». 2014. № 3. С. 35—42.

3. **Фадеев Ю.П. и др.** Проектные решения реакторной установки РИТМ-200, предназначенные обеспечить экологически безопасную и экономически эффективную эксплуатацию универсального атомного ледокола на арктических трассах // Арктика: экология и экономика. 2014. № 3 (15). С. 86—91.

4. **Лепехин А.Н. и др.** Анализ аварий с потерей теплоносителя по кодам КОРСАР/BR и RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 на установке РИТМ.200 при подключении пассивных систем безопасности // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. 2017. № 1 (7). С. 29—40.

5. **Dean Wang, Yoder G.L., Pointerb D.W., Holcomb D.E.** Thermal Hydraulics Analysis of the Advanced High Temperature Reactor // Nuclear Eng. Design. 2015. No. 294. Pp. 73—85.

6. **Richard J. e. a.** Implementation of Liquid Salt Working Fluids Into TRACE, Proceedings of ICAPP. 2014. V. 3. Pp. 1775—1785.

7. **Шараевский Г.И.** Проблемы валидации исходного аварийного события Чернобыльской катастрофы // Ядерна та радіаційна безпека. 2016. № 1 (96). С. 20—27.

В этом случае время осушения, полученное по *RELAP5*, стоит принимать за консервативную оценку.

### Заключение

Представлены результаты экспериментального и численного моделирования нагрева открытой системы с низкими тепловыми потоками. Показано, что после некоторых корректировок расчетной модели, программу *RELAP5*, разработанную для анализа водных систем под давлением, можно использовать для инженерных оценок в задачах разогрева обезвоженных систем.

При изучении нагрева открытых водных систем нужно учитывать, что при отсутствии в *RELAP5* фазового превращения теплоносителя за счет испарения с поверхности при параметрах, далеких от насыщения, снижение уровня воды происходит в результате кипения. Полученное в этом случае время осушения системы следует использовать как консервативную оценку.

Представленные в работе результаты стоит рассматривать как рекомендации для подготовки расчетных моделей систем с низкими тепловыми потоками для программы *RELAP5*.

### References

1. **Pasport** Programmnogo Sredstva № 409 от 08.12.2016 g. dlya Teplogidravlicheskih Raschetov Perekhodnykh i Avariynykh Rezhimov Reaktornykh Ustanovok RBMK RELAP5/mod3.2. M.: Rostekhnadzor, 2016. (in Russian).

2. **Nikulin E.V., Sobolev A.V., Volkov Yu.V.** Ocenka Pokazateley Bezopasnosti dlya Reaktora Tipa MBIR s Pomoshch'yu Raschetnogo koda RELAP. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Seriya «Yadernaya Energetika». 2014;3:35—42. (in Russian).

3. **Fadееv Yu.P. i dr.** Proektnye Resheniya Reaktornoy Ustanovki RITM-200, Prednaznachennye Obespechit' Ekologicheskii Bezopasnuyu i Ekonomicheskii Effektivnuyu Ekspluatatsiyu Universal'nogo Atomnogo Ledokola na Arkticheskikh Trassakh. Arktika: Ekologiya i ekonomika. 2014;3 (15):86—91. (in Russian).

4. **Lepekhin A.N. i dr.** Analiz Avariyy s Poterey Teplosityelya po Kodam KORSAR/BR i RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 na Ustanovke RITM.200 pri Podklyuchenii Passivnykh Sistem Bezopasnosti. Tekhnologii Obespecheniya Zhiznennogo Cikla Yadernykh Energeticheskikh Ustanovok. 2017;1 (7):29—40. (in Russian).

5. **Dean Wang, Yoder G.L., Pointerb D.W., Holcomb D.E.** Thermal Hydraulics Analysis of the Advanced High Temperature Reactor. Nuclear Eng. Design. 2015;294:73—85.

6. **Richard J. e. a.** Implementation of Liquid Salt Working Fluids Into TRACE, Proceedings of ICAPP. 2014;3:1775—1785.

7. **Sharaevskiy G.I.** Problemy Validatsii Iskhodnogo Avariynogo Sobytiya Chernobyl'skoy Katastrofy. Yaderna ta Radiatsiyna Bezpeka. 2016;1 (96):20—27. (in Russian).

8. **Осипов А.М. и др.** Экспериментальное исследование нагрева систем с низкими тепловыми потоками // Атомная энергия. 2019. № 126 (6). С. 307—311.

9. **Осипов А.М. и др.** Расчетное моделирование систем с низкими тепловыми потоками // Атомная энергия. 2019. № 126 (2). С. 76—80.

10. **Крейт Ф., Блэк У.** Основы теплопередачи. М.: Мир, 1983.

8. **Osipov A.M. i dr.** Eksperimental'noe Issledovanie Nagreva Sistem s Nizkimi Teplovymi Potokami. Atomnaya Energiya. 2019;126 (6):307—311. (in Russian).

9. **Osipov A.M. i dr.** Raschetnoe Modelirovanie Sistem s Nizkimi Teplovymi Potokami. Atomnaya Energiya. 2019;126 (2):76—80. (in Russian).

10. **Kreyt F., Blek U.** Osnovy Teploperedachi. M.: Mir, 1983. (in Russian).

#### Сведения об авторах:

**Брагин Евгений Юрьевич** — научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт», e-mail: Bragin\_EY@nrcki.ru  
**Гольцев Александр Олегович** — начальник лаборатории НИЦ «Курчатовский институт», e-mail: Goltsev\_AO@nrcki.ru  
**Ильин Александр Валентинович** — ведущий инженер НИЦ «Курчатовский институт», e-mail: Ilyin-al@mail.ru  
**Осипов Алексей Михайлович** — начальник отдела НИЦ «Курчатовский институт», e-mail: Osipov\_AM@nrcki.ru  
**Прохоренков Сергей Викторович** — инженер НИЦ «Курчатовский институт», e-mail: Prokhorenkov\_SV@nrcki.ru  
**Смирнова Анастасия Константиновна** — младший научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт», e-mail: Smirnova\_AK@nrcki.ru

#### Information about authors:

**Bragin Evgeniy Yu.** — Research Assistant of NRC «Kurchatov Institute», e-mail: Bragin\_EY@nrcki.ru  
**Gol'tsev Aleksandr O.** — Head of the Laboratory of NRC «Kurchatov Institute», e-mail: Goltsev\_AO@nrcki.ru  
**I'yin Aleksandr V.** — Leading Engineer of NRC «Kurchatov Institute», e-mail: Ilyin-al@mail.ru  
**Osipov Aleksey M.** — Head of Department of NRC «Kurchatov Institute», e-mail: Osipov\_AM@nrcki.ru  
**Prokhorenkov Serhey V.** — Engineer of NRC «Kurchatov Institute», e-mail: Prokhorenkov\_SV@nrcki.ru  
**Smirnova Anastasiya K.** — Junior Researcher of NRC «Kurchatov Institute», e-mail: Smirnova@nrcki.ru

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 09.07.2019

**The article received to the editor:** 09.07.2019