

УДК 621.039.743

**А. А. Андрижиевский**, доктор технических наук, профессор (БГТУ);  
**А. Г. Трифонов**, доктор технических наук, профессор (БГТУ);  
**Т. Ю. Пронкевич**, младший научный сотрудник (ОИЭЯИ – Сосны НАН Беларуси)

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ УСЛОВИЙ СУХОГО КОНТЕЙНЕРНОГО ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Приведены примеры решения системы многомерных уравнений сохранения для модельных аналогов сухих контейнерных хранилищ отработавшего ядерного топлива. Получены пространственные распределения температур и поля скоростей для естественной и вынужденной конвекции для различных типов хранилищ. Компьютерное моделирование на основе решения многомерных уравнений сохранения может быть использовано как средство повышения точности расчетов с целью повышения безопасности и снижения затрат при хранении отработавшего ядерного топлива.

Examples of multidimensional solutions for conservation equations for model analogues of dry container storage of spent nuclear fuel are presented. Spatial distribution of temperature and velocity fields for natural and forced convection as applied for different storage types are developed. Computer simulation on the basis of the solution of multidimensional conservation equations can be used as a means to improve the accuracy of the calculations directed to safety and cost reduce for the storage of spent nuclear fuel.

**Введение.** В технологическом цикле атомной электростанции (далее – АЭС) одним из важных компонентов является отработавшее ядерное топливо (далее – ОЯТ), которое образуется в процессе выработки энергии в ядерных реакторах. Выгруженное из реактора ОЯТ первоначально направляется на хранение в бассейны выдержки для снижения остаточного тепловыделения, а затем переводится на сухое хранение [1].

В большинстве стран, обладающих развитой инфраструктурой атомной энергетики, принято решение о продлении срока хранения ОЯТ после выгрузки его из реактора и, как следствие, необходимость перехода к длительному сухому хранению ОЯТ.

Это, в свою очередь, привело к изменению технологических требований к процессу хранения как с точки зрения повышения безопасности обращения с ОЯТ, так и по экономическим и технико-технологическим показателям.

В настоящее время существуют два основных типа технологий сухого хранения ОЯТ [2]:

- контейнерного пристанционного (рис. 1) и централизованного (рис. 2) хранения;
- камерного хранения (рис. 3).

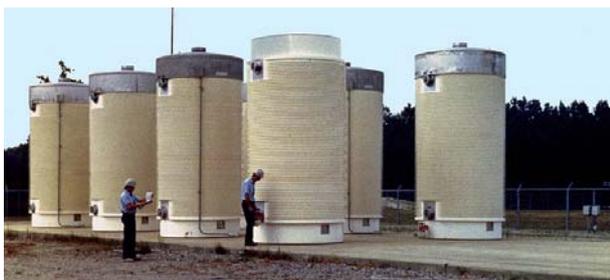


Рис. 1. Сухое контейнерное пристанционное хранилище ОЯТ



Рис. 2. Централизованное сухое контейнерное хранилище ОЯТ

Ко всем методам сухого хранения ОЯТ предъявляются следующие требования [1]:

- обеспечение сохранности ОЯТ в течение не менее 50 лет;
- обеспечение температурного режима на оболочке тепловыделяющих элементов при хранении в среде инертного газа не более 400°C для ОЯТ ВВЭР-1000;
- обеспечение пассивного способа отвода тепла от хранимого ОЯТ.

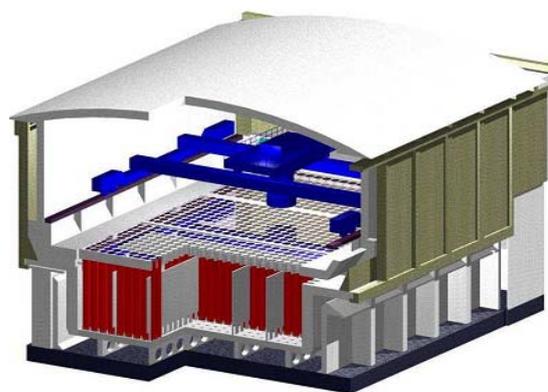


Рис. 3. Разрез сухого хранилища ОЯТ камерного типа

**Постановка задачи.** Существующие методы расчета тепловых потоков в хранилищах ОЯТ основаны на обработке экспериментальных данных и интегральных методиках. Однако современные хранилища ОЯТ представляют собой сложные конструкции, в которых имеются различные режимы для отвода остаточного тепловыделения.

Поэтому для повышения достоверности интегральной методики необходимо получить большое количество экспериментальных данных, что потребует существенных затрат.

Снижение затрат на хранение ОЯТ связано с внедрением надежных методик расчета. Основой таких методик может служить решение многомерных уравнений сохранения с учетом необходимых граничных условий. Подобные системы уравнений должны быть построены для сложных геометрических структур и учитывать режимы теплоотвода при естественной и вынужденной конвекции.

**Метод расчета.** Для описания процессов переноса в данном модельном эксперименте используется  $k$ - $\epsilon$ -модель движения рабочей среды и метод конечных элементов в интерпретации системы COMSOL 4.1.

Модель описания процессов переноса строится на решении универсальных уравнений сохранения энергии, количества движения и массы:

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} - \nabla \left[ \left( \eta + \rho \frac{C_\mu k^2}{\sigma_k \epsilon} \right) \cdot (\nabla U + (\nabla U)^T) \right] + \rho U \cdot \nabla U + \nabla P = 0;$$

$$\nabla U = 0;$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U_j \cdot \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + J_T,$$

где  $\rho$  – плотность рабочей среды;  $U$  – скорость потока;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости;  $P$  – гидростатическое давление;  $k$  – кинетическая энергия турбулентности;  $\epsilon$  – диссипация турбулентной энергии;  $C_\mu$ ,  $\sigma_k$  – модельные константы;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $J_T$  – объемный тепловой источник.

Для описания турбулентных режимов используется  $k$ - $\epsilon$ -модель расчета турбулентной вязкости:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} - \nabla \left[ \left( \eta + \rho \frac{C_\mu k^2}{\sigma_k \epsilon} \right) \cdot \nabla k \right] + \rho U \cdot \nabla k =$$

$$= \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} (\nabla U + (\nabla U)^T)^2 - \rho \epsilon;$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} - \nabla \left[ \left( \eta + \rho \frac{C_\mu k^2}{\sigma_\epsilon \epsilon} \right) \cdot \nabla \epsilon \right] + \rho U \cdot \nabla \epsilon =$$

$$= \rho C_{\epsilon 1} C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} (\nabla U + (\nabla U)^T)^2 - \rho C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k},$$

где  $C_\mu$ ,  $C_{\epsilon 1}$ ,  $C_{\epsilon 2}$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\epsilon$  – стандартизованные модельные константы, значения которых приведены в таблице.

**Значения модельных констант**

Константа	Значение
$C_\mu$	0,09
$C_{\epsilon 1}$	0,1256
$C_{\epsilon 2}$	1,92
$\sigma_k$	1,0
$\sigma_\epsilon$	1,6

**Результаты вычислительного эксперимента.** Численное моделирование теплообменных процессов при хранении ОЯТ было реализовано для двух модельных аналогов:

- централизованного сухого контейнерного хранения ОЯТ;
- пристанционного сухого контейнерного хранения ОЯТ.

В первом случае, рассматривалась модель помещения для централизованного хранения ОЯТ с габаритными размерами 20×20×30 м. Основное внимание в данном вычислительном эксперименте уделялось процессам, протекающим в стесненных условиях при естественной и вынужденной вентиляции.

Модельный аналог (рис. 4) включал в себя вентиляционные отверстия (размером 1×2 м) для подачи и отвода охлаждающего газа, а также набор цилиндрических контейнеров (диаметром 2,5 м и высотой 5 м), на поверхности которых могут быть заданы граничные условия, характерные для режимов хранения ОЯТ.

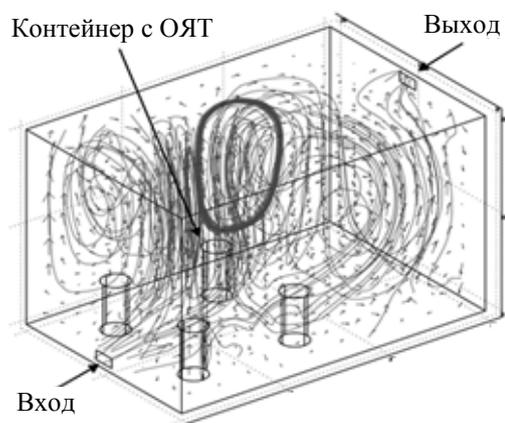


Рис. 4. Линии тока и векторы поля скоростей в хранилище с набором контейнеров

Температура на поверхности одного из контейнеров, представляющего собой аналог контейнера с загруженным в него ОЯТ, равна 350 К. Температура входного потока – 293 К. Скорость входного потока воздуха – 5 м/с.

Данные параметры, а также характеристики помещения для контейнерного сухого хранения ОЯТ соответствуют реальным конструкторским решениям, что позволяет говорить о достоверности результатов приложения модельных аналогов.

При решении многомерных уравнений сохранения получена сложная картина газодинамических течений, определяющих тепловые потоки, с учетом вынужденного и естественного охлаждения загруженного контейнера (рис. 4, 5).

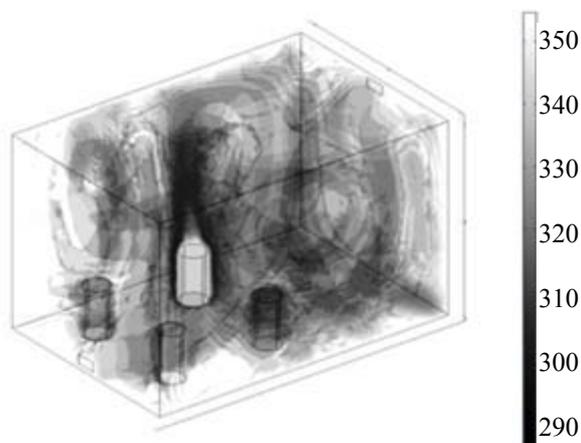


Рис. 5. Пространственное распределение температуры в хранилище с набором контейнеров при температуре входного потока – 293 К и на поверхности контейнера с ОЯТ – 350 К

Сложный характер газодинамических течений оправдывает использование многомерных моделей по сравнению с интегральными методами расчета.

Во втором случае рассматривалась модель хранения ОЯТ в контейнерах на площадке АЭС при естественном охлаждении внешним воздушным потоком (рис. 6, 7).

Размеры расчетной области: высота и ширина 20 м, длина 30 м. Размеры контейнера: диаметр 2,5 м, высота 5 м, внешний диаметр ребра 2,7 м, толщина 0,03 м, количество ребер 8. Шаг расположения контейнеров 6 м.

Температура внешней среды 293 К. Удельное тепловыделение с поверхности контейнера с ОЯТ 1 кВт/м<sup>2</sup>. Шкала температур от 293 до 320 К.

Расчетные значения изолиний поля температур могут быть использованы для оценки максимальной температуры внутри и на поверхности контейнера.

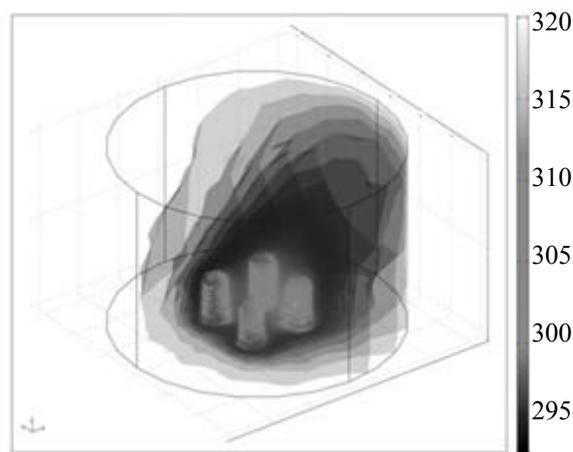


Рис. 6. Результаты расчета изолиний поля температур при обтекании контейнеров ОЯТ внешним воздушным потоком, с максимальной скоростью 0,5 м/с ( $T_{\min} = 293,72$  К – воздушный поток,  $T_{\max} = 364,5$  К – на поверхности контейнера)

Анализ рисунков показал, что максимальная температура на поверхности контейнера с ОЯТ существенно зависит от характеристик внешнего охлаждающего потока. Показано, что увеличение максимальной скорости внешнего охлаждающего потока с 0,5 м/с (рис. 6) до 5 м/с (рис. 7) существенно снижает максимальную температуру поверхности контейнера.

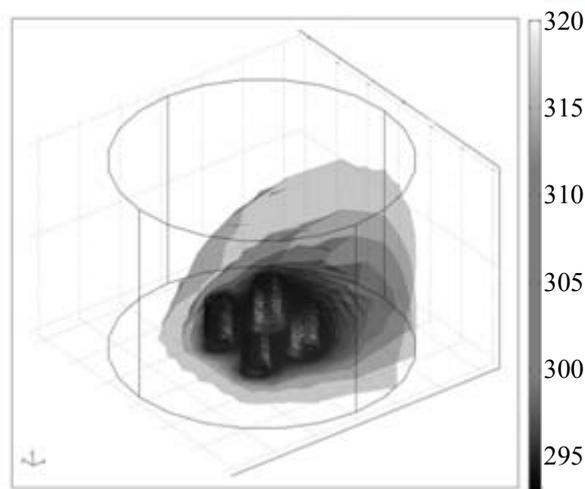


Рис. 7. Результаты расчета изолиний поля температур при обтекании контейнеров ОЯТ внешним воздушным потоком, с максимальной скоростью 5 м/с ( $T_{\min} = 293,17$  К – воздушный поток,  $T_{\max} = 308,6$  К – на поверхности контейнера)

В заключение данного раздела приведем результаты сравнительного анализа удельного теплосъема с поверхности контейнеров с ОЯТ в условиях свободно конвективного теплосъема

(рис. 8), полученные из решения многомерного модельного аналога и расчета с использованием интегральной методики [4]:

$$Nu_L = \left( 825 \cdot 10^{-3} + \frac{387 \cdot 10^{-3} \cdot Ra_L^{\frac{1}{6}}}{\left[ 1 + \left( \frac{492 \cdot 10^{-3}}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$Ra_L = 2g \left( \frac{\rho^2 C_p}{\eta k} \right) \frac{T_{surface} - T_{ambient}}{T_{surface} + T_{ambient}} L^3,$$

где  $Nu_L$ ,  $Ra_L$ ,  $Pr$  – числа Нуссельта, Рэлея и Прандтля соответственно;  $L$  – характерный размер;  $T_{surface}$ ,  $T_{ambient}$  – температуры поверхности и окружающей среды, соответственно.

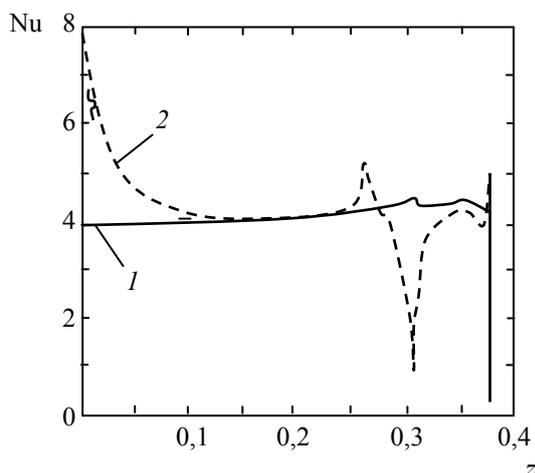


Рис. 8. Изменение коэффициента теплоотдачи по высоте контейнера:  
1 – интегральная модель;  
2 – многомерная модель

Характер кривых на рис. 8 свидетельствует, что интегральная методика не вполне адекватно описывает тепловые процессы в областях сложной конфигурации – в нижней и верхней зонах контейнера с ОЯТ.

Условия проведения тестового вычислительного эксперимента аналогичны приведенным выше.

Результат данного тестового эксперимента подтверждает правомерность использования многомерных модельных аналогов к описанию процессов тепломассопереноса в системах сухого контейнерного хранения ОЯТ.

**Заключение.** 1. В работе представлены модельные многомерные вычислительные аналоги систем сухого контейнерного хранения отработавшего ядерного топлива на АЭС.

2. Результаты применения данных модельных аналогов, включая расчеты полей температур и функций тока в условиях естественной и вынужденной конвекции в областях сложной конфигурации, показали их физическую непротиворечивость и достоверность при описании тепловых параметров охлаждения ОЯТ для практически важных случаев:

- хранения ОЯТ в цилиндрических контейнерах на открытом воздухе;
- хранения ОЯТ в контейнерах внутри стесненных специализированных помещений.

3. В процессе проведения модельных экспериментов получен ряд важных для практики результатов. Так, показано, что температуры поверхностей контейнеров с ОЯТ находились в диапазоне 300–350 К, что значительно ниже предельно допустимой температуры ~400 К. При этом следует отметить, что температура охлаждаемого контейнера существенно зависит от скорости внешнего набегающего потока.

4. В данных вычислительных экспериментах геометрические характеристики контейнеров и специализированных помещений для и хранения, параметры остаточного тепловыделения ОЯТ, а также граничные и начальные условия соответствовали реальным конструкторским решениям.

Тем не менее, следует отметить, что полученные результаты и сделанные на их основе выводы носят, на данной стадии исследований, предварительный характер и требуют детализации.

5. Показано, что решение многомерных уравнений сохранения дает возможность уточнить параметры теплоотдачи и оптимизировать условия хранения ОЯТ, что, в свою очередь, будет способствовать повышению безопасности и снижению затрат при сухом контейнерном хранении ОЯТ.

## Литература

1. Технологический процесс перевода ОЯТ РБМК-1000 с «мокрого» на «сухое» хранение / В. И. Калинин [и др.]. – СПб.: ВНИПИЭТ, 2010. – С.107.
2. Federovich, E. D. Technical Issues of Wet and Dry Storage Facilities for Spent Nuclear Fuel / E. D. Federovich, I. I. Poluzunov // Safety Related Issues of Spent Nuclear Fuel Storage. – Springer, 2007. – P. 189–208.
3. Хранение отработавшего ядерного топлива энергетических реакторов / В. И. Калинин [и др.]. – СПб.: ВНИПИЭТ, 2009. – С.107.
4. Incropera, F. P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer / F. P. Incropera, D. P. DeWitt. – New York: John Wiley & Sons, 1996. – P. 350.

Поступила 02.03.2011

УДК 629.58

**А. Г. Трифонов**, доктор технических наук, профессор (БГТУ);  
**Ю. Е. Крюк**, кандидат биологических наук (ГНУ «ОИЭЯИ – Сосны» НАН Беларуси)

### МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ РИСКА ПЕРСОНАЛА АЭС

Проведен анализ современной организации радиационной защиты персонала. Показано, что сегодня на практике в ее основе лежит соблюдение принципа ограничения доз облучения, гарантирующего отсутствие детерминированных эффектов облучения, а применение принципа оптимизации, направленного на снижение существующих доз облучения и радиационного риска, требует, в том числе, рассмотрение методики оценки риска. Приведены расчеты и сделан вывод, что оценки риска позволят ранжировать работников по величине потенциальной опасности и обосновывать реализацию принципа оптимизации радиационной защиты.

The analysis of the modern organization of radiation protection was done. It is shown that at today's practice it is based on the principle of limiting radiation doses to guarantee the absence of deterministic effects of irradiation and the application of the principle of optimization aimed at reducing the existing dose and radiation risk, requires, inter alia, consideration of risk assessment methodologies. The calculations were done and concluded that the risk assessment will rank the employees in magnitude of the potential hazard and justify the implementation of the principle of optimization of radiation protection.

**Введение.** В настоящее время в Республике Беларусь облучению постоянно подвергаются около 2000 человек в ходе их профессиональной деятельности, и это количество увеличится как минимум вдвое при эксплуатации АЭС.

Организация дозиметрического контроля преследует, прежде всего, цель не превышения предельно допустимой величины дозы облучения работника. В качестве предела дозы используют значение эффективной или эквивалентной дозы техногенного облучения персонала за счет нормальной эксплуатации радиационного объекта, в соответствии с НРБ–2000 [1] и ОСП–2002 [2].

В Беларуси, как и во всем Советском Союзе, до 1954 г. в качестве предела дозы была принята величина 300 мЗв. После первых данных об испытании ядерного оружия она была снижена в 2 раза. А в 1960 г. Международной Комиссией о Радиологической защите (МКРЗ) в качестве предела дозы была рекомендована величина в 50 мЗв. В 1991 г. выходит одна из самых известных публикаций МКРЗ – 60 публикация [3]. Новым рекомендованным пределом облучения персонала являлась величина 20 мЗв в год в среднем за 5 лет, но не более 50 мЗв в отдельно взятый год. Потребовалось почти 10 лет, для того чтобы в Республике Беларусь начал действовать этот предел. Это величина актуальна и сегодня [1, 2].

Однако, простого соблюдения пределов доз недостаточно для достижения приемлемого уровня защиты [3,4]. Пределы дозы представляют нижнюю границу области неприемлемых величин облучения. Их непревышение гарантирует отсутствие детерминированных эффектов облучения. На снижение вероятности возникновения стохастических эффектов направ-

лен другой принцип радиационной защиты – принцип оптимизации.

Согласно [3] никакие дозы не могут быть абсолютно безопасными. Поэтому, в основе радиационной защиты, наряду с использованием пределов доз облучения, постулируется принцип оптимизации, подразумевающий ограничение облучения не только по дозе, но и по вероятности ущерба здоровью человека с учетом существующих экономических и социальных факторов [1, 3].

Целью данной статьи является рассмотрение возможности использования концепции радиационного риска как инструмента для организации индивидуализированного подхода к организации радиационной защиты персонала АЭС.

**Материалы и методы.** События прошлого века, связанные с авариями и военным использованием источников ионизирующего излучения дали мощный толчок к развитию научных исследований в области радиационной безопасности.

Основываясь на полученных результатах, Научный комитет ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) предложил модели по оценке радиационного риска [5], а Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) распространило новые технологии для оценки риска в ситуации профессионального облучения [6].

В основе модели НКДАР ООН лежит определение величины радиационного риска с использованием рекомендованных МКРЗ форм – аддитивной и мультипликативной [3].

Согласно аддитивной модели определяется вызванная облучением абсолютная величина превышения числа наблюдаемых случаев заболеваний ( $m$ ) над ожидаемым ( $m_0$ ):