

УДК 536.24

С. В. Алёхина, канд. техн. наук

В. Н. Голощатов, канд. техн. наук

А. О. Костиков, д-р техн. наук

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины
(г. Харьков, e-mail: kostikov@ipmach.kharkov.ua)

ОПТИМИЗАЦИЯ ШИРИНЫ ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ТРАКТА КОНТЕЙНЕРА С ОТРАБОТАННЫМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ

С использованием решения геометрической обратной сопряженной задачи теплопереноса выполнена оптимизация ширины вентиляционного канала контейнера хранения отработанного ядерного топлива. Выработаны рекомендации по выбору этого параметра при изготовлении контейнеров для хранения отработавших топливных сборок с повышенной глубиной выгорания.

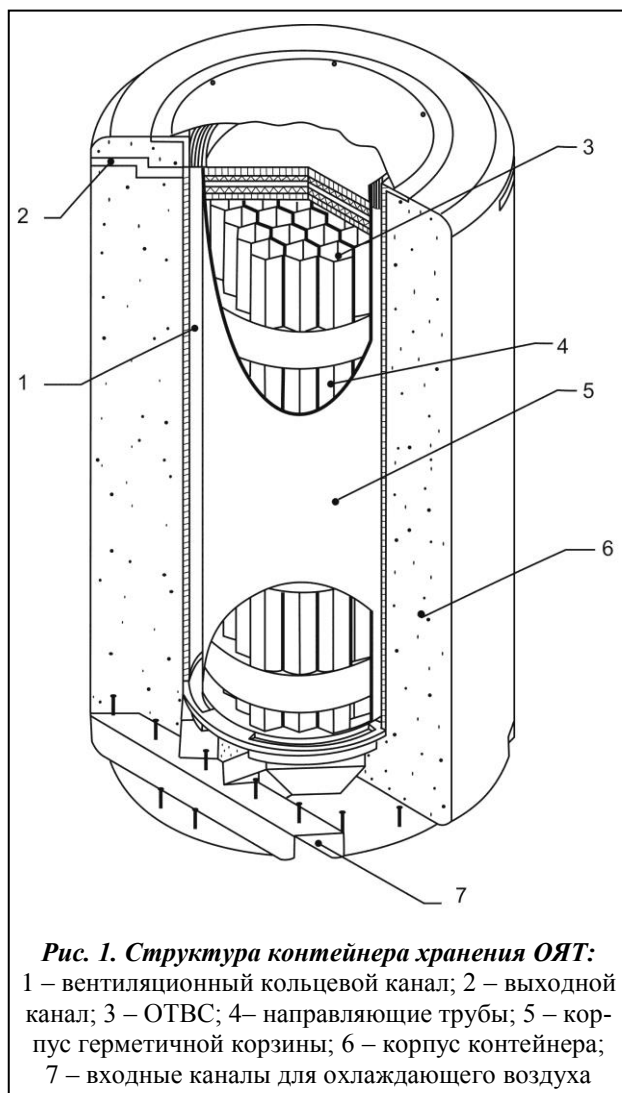
З використанням розв'язання геометричної оберненої спряженої задачі теплопереносу виконана оптимізація ширини вентиляційного каналу контейнера зберігання відпрацьованого ядерного палива. Вироблені рекомендації з вибору цього параметра при виготовленні контейнерів для зберігання відпрацьованих паливних збірок з підвищеним ступенем вигорання.

Введение

Одним из широко распространённых в мире способов хранения отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и одним из эффективных как с экологической точки зрения, так и с точки зрения капитальных вложений и расходов на эксплуатацию является сухое хранение отработанного топлива. В этом случае ОЯТ хранится в герметичных металлических корзинах, заполненных инертным газом, которые, в свою очередь, помещаются в металлический или бетонный контейнер, предотвращающий механическое повреждение корзины и служащий дополнительным барьером радиационной защиты [1]. Контейнеры могут размещаться как на открытых площадках, так и в специальных зданиях-хранилищах. При этом теплота, выделяемая ОЯТ, отводится в окружающее пространство путём воздушной конвекции за счёт естественной тяги в вентиляционных каналах либо принудительно в результате работы вентиляционных систем.

Основной целью любого хранилища ОЯТ является исключение радиационного загрязнения окружающей среды и предотвращение облучения обслуживающего персонала. Для этого необходимо, прежде всего, обеспечить невозможность разгерметизации оболочек отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС), размещённых в корзине хранения, и самого корпуса корзины. Если учесть тот факт, что механическое повреждение оболочек при нормальных условиях эксплуатации хранилища и большинстве внештатных ситуаций маловероятно, то основополагающим фактором, который может привести к разгерметизации ОТВС, являются их тепловые деформации вследствие высокого нагрева за счёт остаточного тепловыделения ОЯТ.

Судя по опыту эксплуатации сухого хранилища ОЯТ на Запорожской АЭС, для пристанционных хранилищ украинских АЭС будет характерна концентрация большого числа контейнеров на малых площадях (так, первая очередь СХОЯТ Запорожской АЭС содержит 100 контейнеров на площадке в 11904 м^2 [2]). Данное обстоятельство может привести к уменьшению отвода тепла от ОТВС, расположенных в контейнерах хранения и, как следствие, к увеличению их температуры и разгерметизации. Кроме того, в связи с глобальным потеплением меняются климатические условия на территории Украины. Так, в г. Энергодар



корпусом и боковой стенкой контейнера образуется вентиляционный кольцевой канал, в котором происходит передача тепла от стенки корзины к воздуху и за счёт естественной тяги тепло выводится из контейнера в окружающее пространство. Контейнеры с ОЯТ хранятся на специальной открытой площадке, расположенной на территории АЭС.

Для ОЯТ реактора ВВЭР-1000, которые хранятся на СХОЯТ Запорожской АЭС, в проектных документах принято максимально допустимое значение температуры оболочек тепловыделяющих элементов $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ при нормальном режиме длительного сухого хранения в гелиевой среде и $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ для кратковременных переходных режимов и экстремальных погодных воздействий (температура наружного воздуха равна $40\text{ }^{\circ}\text{C}$) [3].

Для прогнозирования теплового состояния ОЯТ на этапе проектирования хранилища ОЯТ невозможно обойтись без привлечения методов математического моделирования. Следует отметить, что система «ОЯТ – гелий – корзина хранения – вентиляционный воздух – корпус контейнера – окружающая среда» является достаточно сложной с тепловой точки зрения. В ней задействованы все три механизма передачи тепла: кондуктивный, конвективный и лучистый. Все эти процессы происходят в объекте достаточно сложной пространственной формы при наличии большого количества факторов, оказывающих внутреннее и внешнее воздействие на данную систему: начальная мощность тепловыделения ОЯТ при их отправке на хранение, изменение мощности тепловыделения в процессе хранения, разнообразное воздействие погодных условий (изменение температуры окружающего воз-

температура воздуха на уровне $37\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$ может держаться на протяжении нескольких недель, что уже не является кратковременным экстремальным воздействием, как это предполагалось на этапе проектирования СХОЯТ. Поэтому задача обеспечения приемлемого теплового режима хранения ОЯТ в сухих хранилищах – одна из основных задач экологической безопасности на протяжении всего срока хранения.

Постановка задачи

Первым и на сегодняшний день единственным хранилищем ОЯТ на территории Украины является сухое хранилище ОЯТ (СХОЯТ) на Запорожской АЭС [2], которое было введено в эксплуатацию в 2001 г. В нём используются отечественные контейнеры, прототипом которых служат американские контейнеры VSC-24. Схематическое устройство такого контейнера изображено на рис. 1. В каждом контейнере хранится 24 ОЯТ, которые вертикально помещаются в шестигранные трубные чехлы (направляющие трубы), являющиеся конструктивными элементами цилиндрической герметичной корзины. Она заполнена гелием, что обеспечивает сухую, инертную, теплопередающую среду в течение всего периода хранения. Корзина размещается в бетонном контейнере. При этом между её

духа, ветровая нагрузка, солнечная радиация, осадки). Поэтому для полноценного решения задачи теплового состояния ОТВС в процессе их хранения необходимо привлекать современный инструментарий математического моделирования тепловых процессов, в частности, CFD-пакеты (FLOWWORKS, ANSYS, FLUENT, PHOENICS, STAR-CD, COSMOSWorks/FlowWorks и др.) [4–7]. Кроме того, как показала практика при выполнении работ, связанных с исследованием тепловых процессов при сухом хранении ОЯТ, ряд исследований невозможно выполнить без использования инструментария обратных задач, в том числе и обратных сопряжённых задач теплопереноса.

Помимо предсказания теплового состояния на этапе проектирования для обеспечения экологической безопасности в процессе эксплуатации хранилищ ОЯТ также необходимо проводить мониторинг теплового состояния ОТВС. В силу особенностей конструкции контейнера и ОТВС выполнять непосредственный мониторинг теплового состояния оболочек тепловыделяющих элементов не представляется возможным. Так, единственный тепловой параметр, который измеряется в процессе эксплуатации СХОЯТ на Запорожской АЭС, – это температура воздуха на выходе из вентиляционных каналов контейнера, которая является косвенным результатом проявлением тепловых процессов, происходящих внутри корзины хранения. Поэтому для идентификации теплового состояния ОТВС, хранящихся в контейнерах, в процессе эксплуатации сухого хранилища целесообразно использовать инструментарий обратных задач.

Таким образом, для обеспечения экологической безопасности сухого хранения ОЯТ необходимо широкомасштабное привлечение аппарата моделирования, идентификации и оптимизации тепловых процессов как на этапе проектирования хранилищ, так и на этапе их эксплуатации. В настоящее время в различных странах проводятся исследования, связанные с моделированием теплового состояния ОТВС в процессе их сухого хранения, в том числе и при помощи решения сопряжённых задач теплопереноса [6 – 16 и др.]. Вместе с тем довольно много проблем ещё остаются актуальными. В частности, начиная с 2003 г. на Запорожской АЭС стали применяться тепловыделяющие сборки альтернативной конструкции с бóльшим максимальным начальным обогащением [17] и соответственно с бóльшим остаточным тепловыделением, хранение которых в СХОЯТ не предусмотрено разработчиками контейнеров. В связи с этим возникает проблема обеспечения их безопасного хранения, которая помимо всего прочего включает и исследования теплового состояния контейнера хранения с более высокой по сравнению с проектной интенсивностью тепловыделения ОЯТ. Так как тепловыделение ОТВС уменьшается в процессе их хранения за счёт полураспада продуктов деления (рис. 2), а математическая модель, как отмечалось в [18, 19], является квазистационарной, то для определения приемлемых с точки зрения неперевышения максимально допустимой температуры вариантов размещения достаточно рассмотреть лишь момент времени, соответствующий началу хранения ОЯТ. Как было показано в работе [8], в СХОЯТ Запорожской АЭС взаимное тепловое влияние контейнеров хранения либо незначительно, либо его можно свести к изменению граничных условий при моделировании отдель-



Рис. 2. Изменение интенсивности тепловыделения ОТВС в ходе хранения, начиная с момента выгрузки из реактора:
1 – ОТВС-А; 2 – ОТВС

но стоящего контейнера. Поэтому в данной работе рассматривается отдельный контейнер хранения.

Так как охлаждение корзины хранения происходит прежде всего за счёт движения воздуха по вентиляционным каналам (см. рис. 1) за счёт естественной тяги, то скорость движения воздуха (а следовательно, и интенсивность теплообмена) при неизменном тепловыделении в корзине зависит прежде всего от гидравлического сопротивления вентиляционного тракта. Очевидно, что изменение геометрических

размеров вентиляционных каналов контейнера хранения ОЯТ приводит к изменению их гидравлических сопротивлений и, следовательно, к изменению условий охлаждения корзины с ОТВС. Существующие размеры вентиляционных каналов определялись их разработчиками на этапе проектирования с учётом данных по теплофизическим свойствам, приведенным в [3]. В то же время проведенные нами исследования [20] позволили уточнить эквивалентную теплопроводность корзины хранения. Кроме того, в силу перехода СХОЯТ Запорожской АЭС на хранение ОТВС-А тепловое состояние корзины хранения изменяется по сравнению с вариантом хранения традиционных ОТВС. Все эти обстоятельства приводят к целесообразности проверки – являются ли существующие геометрические размеры каналов охлаждения наилучшими с точки зрения максимального охлаждения хранящихся в нём ОТВС.

Методика решения

Задача определения геометрических размеров каналов охлаждения, исходя из условия наилучшего охлаждения ОТВС, относится к классу обратных сопряженных задач теплообмена оптимального проектирования [21]. В качестве критерия оптимальности здесь выступает условие минимизации максимальной температуры в корзине хранения. Как уже отмечалось выше, вследствие уменьшения в процессе хранения мощности тепловыделения ОТВС задачу минимизации максимальной температуры достаточно рассмотреть лишь в момент времени, соответствующий началу хранения ОЯТ.

В силу того, что геометрические размеры корзины определяются компоновкой хранящихся в ней ОТВС, её размеры в процессе решения данной задачи менять нецелесообразно. Таким образом, единственный геометрический размер кольцевого вентиляционного канала, которым можно варьировать в задаче оптимального проектирования, – это его наружный диаметр, который определяется внутренним диаметром боковой стенки контейнера. Иными словами, изменяется ширина кольцевого канала h при неизменном радиусе корзины хранения ОТВС. Для того чтобы при изменении размера кольцевого канала входные и выходные вентиляционные каналы не создавали больших гидравлических сопротивлений, их проходное сечение также необходимо изменять пропорционально проходному сечению кольцевого канала.

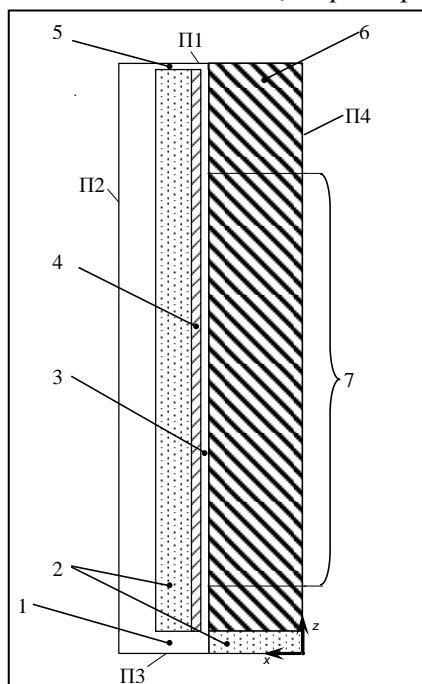


Рис. 3. Упрощенная геометрическая модель контейнера хранения ОЯТ:

- 1 – входной вентиляционный канал;
- 2 – железобетонные конструкции контейнера;
- 3 – кольцевой вентиляционный канал;
- 4 – стальная обечайка стенки контейнера;
- 5 – выходной вентиляционный канал;
- 6 – корзина с ОЯТ;
- 7 – зона

Прямая сопряжённая задача теплопереноса, которая решалась многократно в процессе минимизации целевого функционала, рассматривалась в двумерной осесимметричной постановке с упрощённой геометрической моделью (рис. 3), в которой вместо подробной структуры корзины хранения используется однородное изотропное твёрдое тело с эквивалентной теплопроводностью λ_3 . В качестве эквивалентной теплопроводности корзины хранения задавались значения, полученные в результате проведенных нами расчётных исследований [20]. Входные и выходные каналы достаточно сложной формы были заменены прямыми каналами с эквивалентным гидравлическим сопротивлением.

В основе используемой математической модели сопряжённого теплообмена, которая подробно описана в [18, 19], лежат

- уравнение неразрывности;
- уравнения движения Навье–Стокса, осреднённые по Рейнольдсу;

- уравнения энергии и теплопроводности;
- дифференциальные уравнения модели турбулентности, в качестве которой рассматривалась k - ε -модель;
- уравнения, описывающие лучистый теплообмен согласно закону Стефана–Больцмана.

На границе расчётной области задавались следующие граничные условия:

- на участке П2 (см. рис. 3) атмосферное давление и температура воздуха

$$p|_{\text{П2}} = 101300 \text{ Па,}$$

$$T|_{\text{П2}} = T_a;$$

- участки П1 и П3 – теплоизолированные стенки, то есть теплоотводом через крышку контейнера и плиту-основание, на которой установлен контейнер, пренебрегли;
- участок П4 – ось симметрии.

Температура наружного воздуха принималась равной 40 °С при нулевой скорости ветра (штиль), то есть рассматривался самый неблагоприятный случай погодных условий. Минимизация целевого функционала осуществлялась путём его интерполирования между узловыми точками, каждая из которых соответствовала одной решённой прямой сопряжённой задаче теплопереноса, с последующим нахождением минимума интерполирующего полинома Ньютона.

Результаты расчётов

В табл. 1 и 2 для каждой рассмотренной узловой точки приведены значения оптимизируемого параметра h , целевого функционала J (максимальная температура в корзине хранения), а также ряда других параметров (скорость v и температура T_b воздуха на выходе из вентиляционного тракта, массовый расход воздуха m).

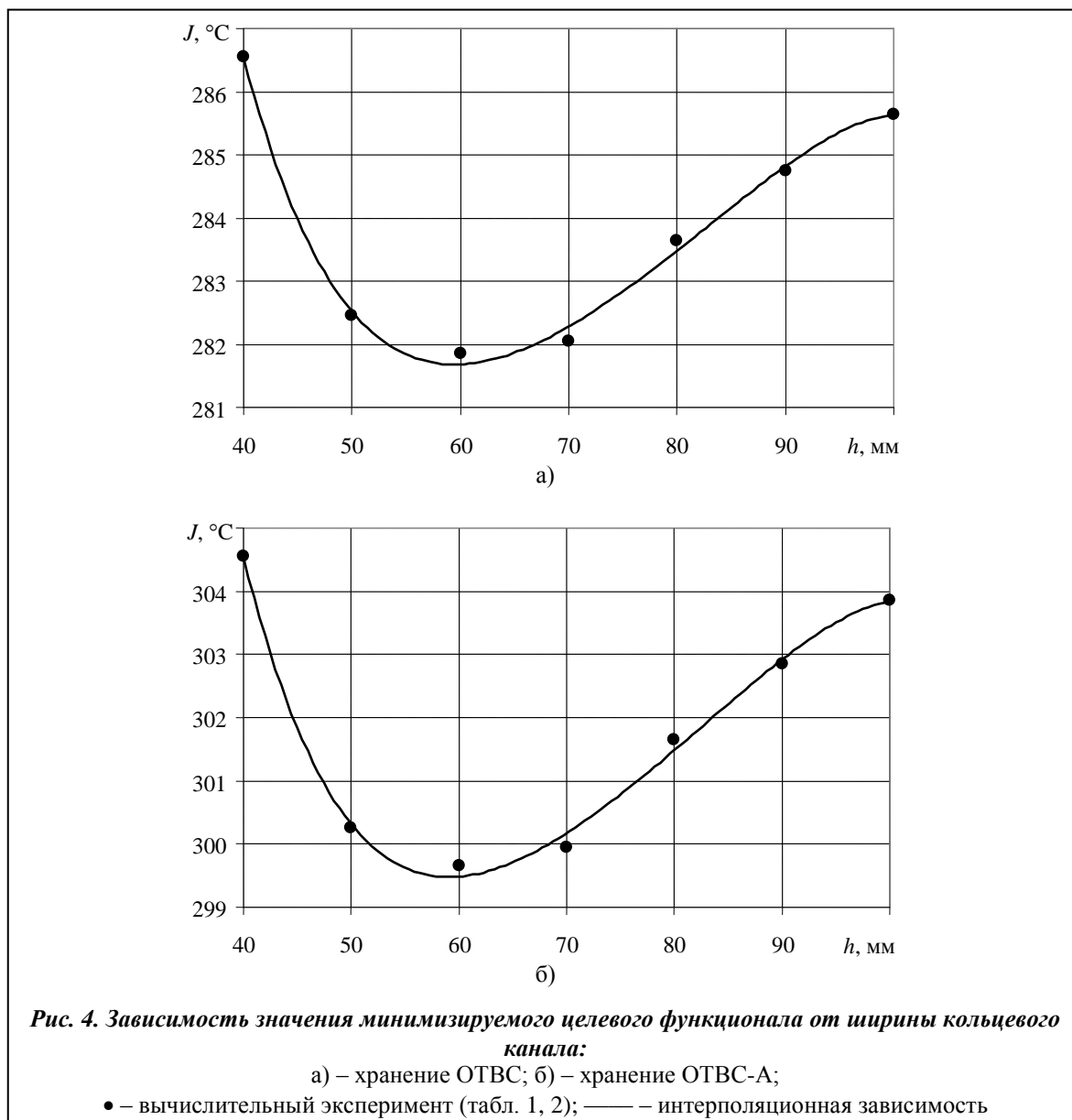
Таблица 1. Влияние ширины кольцевого канала на теплофизические параметры контейнера хранения ОЯТ (начало хранения ОТВС после 5-летней выдержки в бассейне)

h , мм	$J = \max T$, °С	v , м/с	T_b , °С	m , кг/с
40	286,5	0,429	89,8	0,294
50	282,4	0,510	80,0	0,371
60	281,8	0,582	72,9	0,438
70	282,0	0,638	66,3	0,497
80	283,6	0,697	64,2	0,550
90	284,7	0,743	61,4	0,595
100	285,6	0,782	59,2	0,634

Таблица 2. Влияние ширины кольцевого канала на теплофизические параметры контейнера хранения ОЯТ (начало хранения ОТВС-А после 7-летней выдержки в бассейне)

h , мм	$J = \max T$, °С	v , м/с	T_b , °С	m , кг/с
40	304,5	0,447	94,3	0,330
50	300,2	0,531	83,7	0,382
60	299,6	0,605	76,1	0,452
70	299,9	0,664	69,3	0,512
80	301,6	0,724	66,7	0,567
90	302,8	0,771	63,7	0,613
100	303,8	0,811	61,5	0,652

Графическое изображение зависимости максимальной температуры в корзине хранения от ширины кольцевого канала приведено на рис. 4. В результате минимизации интерполирующих многочленов получены следующие значения оптимальной ширины кольцевого канала: в случае хранения ОТВС $h^* = 59,5$ мм, в случае хранения ОТВС-А $h^* = 59,1$ мм. Из рис. 4 также видно, что небольшие отклонения (в пределах 12 мм) ширины кольцевого ка-



нала от оптимальных значений не приводят к существенным изменениям максимальной температуры (её повышение находится в пределах 1 °C). Таким образом, можно сделать вывод, что любое значение ширины кольцевого канала из диапазона 48÷71 мм является приемлемым с точки зрения безопасного хранения как ОТВС, так и ОТВС-А. В частности, при переходе на хранение ОТВС-А в СХОЯТ Запорожской АЭС можно не изменять геометрические размеры контейнера хранения (в настоящее время для ОТВС они изготавливаются с $h = 70$ мм).

Выводы

Путём решения геометрической обратной сопряжённой задачи теплопереноса с использованием интерполяционной зависимости целевого функционала от оптимизируемого параметра определена оптимальная с точки зрения условия соблюдения безопасных тепловых режимов хранения ширина вентиляционного канала контейнера хранения отработанного ядерного топлива. Сформулированы рекомендации относительно выбора этого параметра при изготовлении контейнеров для хранения на территории Запорожской АЭС ОТВС альтернативной конструкции.

Литература

1. *Survey of wet and dry spent fuel storage*: IAEA-TECDOC-1100 – International Atomic Energy Agency, Vienna, 1999 – 103 p.
2. *Официальный сайт Запорожской АЭС. Устройство и описание СХОЯТ [Электронный ресурс]* – Режим доступа: <http://www.npp.zp.ua/snfs/description>.
3. *Отчет по анализу безопасности сухого хранилища отработавшего ядерного топлива Запорожской АЭС. Версия 3.01.1 / ОП «Запорожская АЭС» – Инв. № 1526(3).* – Энергодар, 2008 – 624 с.
4. *Алямовский А. А. SolidWorks/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов / А. А. Алямовский.* – М.: ДМК Пресс, 2004. – 432 с.
5. *Каплун А. Б. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева.* – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 272 с.
6. *FLUENT Flow Modeling Software Product Brochure [Электронный ресурс].* – Режим доступа: <http://www.fluent.com/software/fluent/PDF11004.pdf>. – Название с экрана.
7. *Rosten H. I. Shareware PHOENICS 1.4. Beginner's Guide / H. I. Rosten, D. B. Spalding // CHAM TR 100.* – London, 1993. – 118 p.
8. *Альошина С. В. Моделювання теплових процесів в елементах енергетичного обладнання ТЕС і АЕС шляхом розв'язання спряжених задач теплообміну : Автореф. дис. ... канд. техн. наук.* – Харьков, 2008. – 18 с.
9. *Лозовецкий В. В. Технические аспекты промежуточных хранилищ ОЯТ и радиоактивных отходов / В. В. Лозовецкий, С. Г. Шаронова // Атом. техника за рубежом.* – 2003. – № 1 – С. 3–14
10. *О новом поколении отечественных контейнеров для ОЯТ и РО / А. А. Зубков, Ю. К. Петреня, В. Н. Фромзель и др. // Тр. НПО Центр. котлотурбин. ин-та КТИ.* – 2002. – № 282. – С. 45–51.
11. *Разработка и верификация комплекса программ для исследования температурного состояния и осушения металлобетонного контейнера с отработавшим ядерным топливом / В. К. Ефимов, М. Б. Иванов, В. О. Иванова, О. Д. Черный // Математические модели для исследования и обоснования характеристик оборудования и ЯЭУ в целом при их создании и эксплуатации: Семинар секции динамики, Сосновый Бор, 18–22 сент., 2000. Тезисы докладов.* – Гатчина, 2000. – С. 98–99.
12. *COBRA-SFS: A Thermal-Hydraulic Analysis Code for Spent Fuel Storage and Transportation Casks. Documentation for Cycle 2 / T. E. Michener, D. R. Rector, J. M. Cuta et al..* – Washington: Pacific Northwest Laboratory Richland, 1995. – 346 p.
13. *Dry storage of spent nuclear fuel. Fluent CFD examples [Электронный ресурс].* – Режим доступа: <http://www.fluent.com/solutions/examples/x151.htm>.
14. *Kühne B. Die nächste CASTOR – Generation zur Entsorgung der deutschen Kernkraftwerke / B. Kühne, R. Gartz, A. Voßnacke // Jahrestagung Kerntechnik, 2003: Tagungsbericht, Berlin, 20-22 Mai, 2003. Dtsch. Atomforum, Kerntechn. Ges. Berlin: INFORUM, 2003.* – P. 221–224.
15. *Poskas P. Thermal analysis of casks for interim storage of spent nuclear fuel / P. Poskas, V. Simonis, R. Makarevicius // MECHANICS.* – 1999. – № 2 (17). – P. 47–51.
16. *Stratmann W. Calculation of heat removal from interim storage facilities for the dry storage of spent fuel in dual-purpose casks / W. Stratmann, P. Hages // Intern. symposium on the packaging and transportation of radioactive materials. Miami, Florida USA, 2004.* – P. 45–46.
17. *Депенчук А. А. Опыт эксплуатации ТВСА на Запорожской АЭС / А. А. Депенчук, Ю. А. Шишков, О. С. Кабаков // Тр. Одес. политехн. ун-та.* – Одесса, 2008. – Вып. 1 (29). – С. 23–29.
18. *Решение сопряженной задачи теплообмена при исследовании теплового состояния вентилируемого бетонного контейнера с отработавшим ядерным топливом / С. В. Алёхина, В. Н. Голощاپов, А. О. Костиков, Ю. М. Мацевитый // Пробл. машиностроения.* – 2005. – Т. 8, № 4. – С. 12–20.
19. *Исследование теплового состояния вентилируемого контейнера с отработавшим ядерным топливом путем решения сопряженной задачи теплообмена / С. В. Алехина, В. Н. Голощاپов, А. О. Костиков, Ю. М. Мацевитый // VI Минский международный форум по тепло- и массообмену, 19–23 мая 2008 г.: Тез. докл. и сообщ. – Минск, 2008.* – Т. 1 – С. 185–186.
20. *Определение эквивалентной теплопроводности многоместной герметичной корзины хранения отработавшего ядерного топлива путем решения обратной задачи / С. В. Алёхина, В. А. Воронина, В. М. Голощاپов, А. О. Костиков / Ядерна та радіаційна безпека.* – 2009. – Т. 12, № 4. – С. 48–51.
21. *Мацевитый Ю. М. Обратные сопряженные задачи теплопереноса / Ю. М. Мацевитый, А. О. Костиков // Проблемы машиностроения.* – 2007. – Т. 10, № 5. – С. 19–26.

Поступила в редакцию
13.12.12