

УДК536.244:621.039.584

С. В. Алёхина, В. А. Воронина,  
В. Н. Голощапов, А. О. Костиков

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного  
НАН Украины

## Определение эквивалентной теплопроводности многоместной герметичной корзины хранения отработавшего ядерного топлива путем решения обратной задачи

*Разработана методика определения эквивалентной теплопроводности герметичной корзины хранения отработавшего ядерного топлива на основе решения обратной сопряженной задачи теплопереноса. Определена эквивалентная теплопроводность корзины хранения контейнера, эксплуатирующегося на Запорожской АЭС. Исследовано влияние выбора месторасположения реперных точек на получаемое значение эквивалентной теплопроводности.*

С. В. Алёхина, В. А. Воронина, В. М. Голощапов, А. О. Костиков

**Визначення еквівалентної теплопровідності багатомісної герметичної корзины зберігання відпрацьованого ядерного палива шляхом розв'язання оберненої задачі**

*Розроблено методику визначення еквівалентної теплопровідності герметичної корзины зберігання відпрацьованого ядерного палива на основі розв'язання оберненої спряженої задачі теплоперенесення. Визначено еквівалентну теплопровідність корзины зберігання контейнера, що експлуатується на Запорізькій АЕС. Досліджено вплив вибору місцерозташування реперних точок на отримане значення еквівалентної теплопровідності.*

Одной из важных задач при хранении отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) сухим способом является обеспечение безопасных тепловых режимов [1]. Для такого сложного объекта, как хранилище ОЯТ, её невозможно решить без привлечения инструментария математического моделирования [2–7]. Подробный учёт структуры всех элементов моделируемого объекта не всегда целесообразен. Некоторые из них можно представить упрощёнными геометрическими моделями с эквивалентными теплофизическими свойствами.

Целью данной работы является определение эквивалентной теплопроводности многоместной герметичной корзины хранения вентилируемого контейнера хранения (ВКХ-ВВЭР) [8], эксплуатирующегося в сухом хранилище отработавшего ядерного топлива (СХОЯТ) на Запорожской атомной электростанции, прототипом которого является контейнер VSC-24 американской фирмы Sierra Nuclear Corporation [9].

**Постановка задачи.** Структура ВКХ-ВВЭР представлена на рис. 1.24. Отработавшие тепловыделяющие сборки (ОТВС) помещаются в многоместной герметичной корзине (МГК), заполненной инертным газом — гелием, который циркулирует во внутреннем пространстве корзины вследствие естественной конвекции, вызываемой разностью температур горячихборок и холодной оболочки корзины. Передача тепла отборок к корпусу корзины осуществляется не только путем конвекции, но и излучением. Корзина хранения находится в бетонном корпусе, который служит барьером радиационной защиты и предохраняет корзину от механических повреждений, осадков и иных воздействий окружающей среды. Тепло с поверхности корзины отводится за счёт естественной тяги атмосферного воздуха в цилиндрическом вентиляционном канале, который образуется корпусом корзины и металлической обечайкой бетонного корпуса контейнера. В этом случае также присутствует лучистый теплообмен между корпусом МГК и обечайкой корпуса контейнера.

В ряде исследований, посвященных взаимному влиянию группы контейнеров, размещённых на площадке СХОЯТ, моделирование подробной структуры МГК (корпус корзины, направляющие трубы, размещённые в ней ОТВС, циркулирующий гелий) невозможно из-за ограниченности компьютерных ресурсов. В этом случае её целесообразно заменить однородным изотропным телом цилиндрической формы с равномерно распределённым источником теплоты и некоторыми эквивалентными теплофизическими свойствами, которые обеспечивали бы температурное поле, максимально близкое к температурному полю в корзине с локальным распределением тепловых источников — ОТВС.

Очевидно, что мощность равномерно распределённого источника теплоты должна совпадать с суммарной мощностью остаточного тепловыделения ОТВС, помещённых в МГК, а сам источник должен располагаться в зоне тепловыделения ОТВС. В силу медленного уменьшения мощности тепловыделения ОТВС в процессе хранения при слабоменяющихся осреднённых погодных условиях задачу можно рассматривать в квазистационарной постановке. Таким образом, единственной величиной, которую необходимо определить, чтобы можно было использовать упрощённую геометрическую модель МГК, является эквивалентная теплопроводность  $\lambda_3$ .

**Методика определения эквивалентной теплопроводности** основана на решении обратной задачи теплопроводности (ОЗТ) [10, 11]. В отличие от случая, когда определяется эквивалентная теплопроводность композитных твёрдых тел

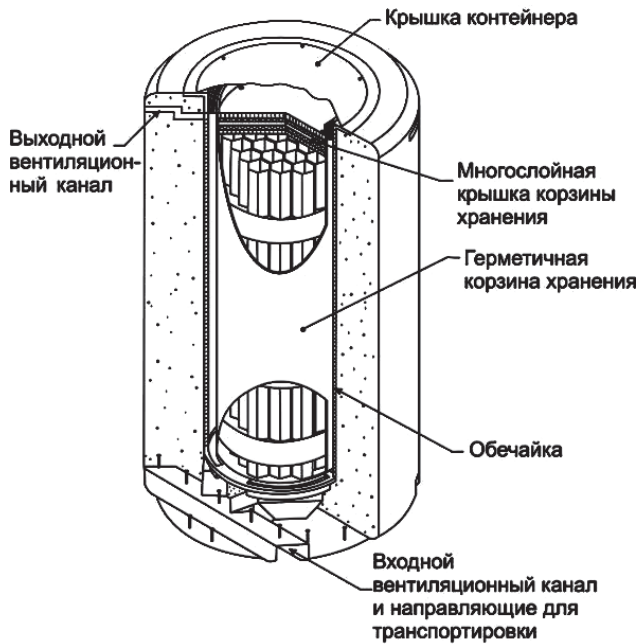


Рис. 1. Структура ВКХ-ВВЭР

и применяется классическая ОЗТ [12], данную задачу из-за наличия подвижной среды (гелий, воздух) необходимо рассматривать в сопряженной постановке и решать обратную сопряженную задачу теплопереноса [13].

Предлагаемая методика заключается в следующем. При одинаковых внешних тепловых воздействиях рассматриваются две задачи, в одной из которых используется подробная геометрическая модель, учитывающая внутреннюю структуру исследуемого объекта — МГК, а в другой — упрощенная, когда исследуемый объект заменяется однородным изотропным телом с эквивалентной теплопроводностью  $\lambda_3$ . Определение последней осуществляется в процессе многократного решения задачи с упрощенной геометрией путем подбора с целью минимизации среднеквадратичной невязки между значениями температур, полученными в результате решения задач с подробной и упрощенной геометрией:

$$\sigma(\lambda_3) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_i^{\text{п}} - T_i^{\text{у}})^2}{N}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $N$  — число так называемых реперных точек, в которых рассматривается отклонение температуры;  $T_i^{\text{п}}$  — температура в  $i$ -й реперной точке, полученная в результате решения задачи с подробной геометрической моделью исследуемого объекта;  $T_i^{\text{у}}$  — температура в  $i$ -й реперной точке, полученная в результате решения задачи с упрощенной геометрической моделью.

Данный подход позволяет получить такое значение эквивалентной теплопроводности, которое дает температурное распределение в исследуемом объекте с упрощенной геометрией, максимально приближенное к температурному распределению в объекте с подробной геометрией.

**Численный эксперимент.** При определении эквивалентной теплопроводности МГК по приведенной методике для получения температурного поля с учетом подробной структуры элементов, расположенных внутри корзины, использовалась трехмерная математическая модель, подробно опи-

санная в [7], которая путем решения сопряженной задачи теплообмена с учетом лучистой составляющей позволяет определить температурное поле внутри МГК. В силу симметрии рассматривалась одна четвертая часть контейнера (рис. 2). Реперные точки, в которых учитывалась температура, используемая в среднеквадратичной невязке (1), были выбраны в наиболее критических с тепловой точки зрения местах: на оси сборок, в точках, где температура достигает максимума. Рассматривалось 80 реперных точек, выбранных на осях восьми ОТВС — №№ 1, 2, 3, 8, 10, 12, 18, 20 (рис. 3), которые располагались на 10 уровнях, равномерно расположенных по оси ОТВС.

К ним были добавлены 60 реперных точек на направляющих трубах внутри корзины и 30 — на корпусе МГК. Они выбирались на тех же 10 уровнях, что и реперные точки на оси ОТВС, т. е. рассматривались точки на трех вертикальных линиях, проходящих через корпус корзины, и на шести вертикальных линиях, проходящих через стенки направляющих труб. Кроме того, по 14 реперных точек было выбрано на крышке и днище МГК.

Соответствующая модель с упрощенной геометрией получена заменой МГК на однородное изотропное тело. При этом остальная часть расчетной области (геометрия вентиляционного канала, стенок контейнера и окружающего воздуха) и граничные условия оставались такими же, как и при использовании подробной геометрической модели, а тепловыделение отработавших сборок моделировалось

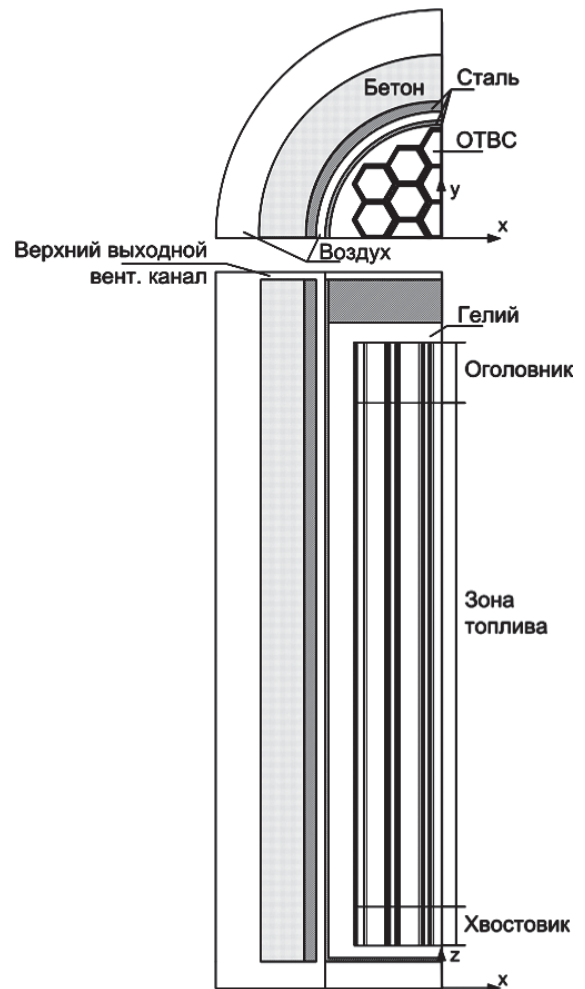


Рис. 2. Подробная геометрическая модель ВКХ-ВВЭР

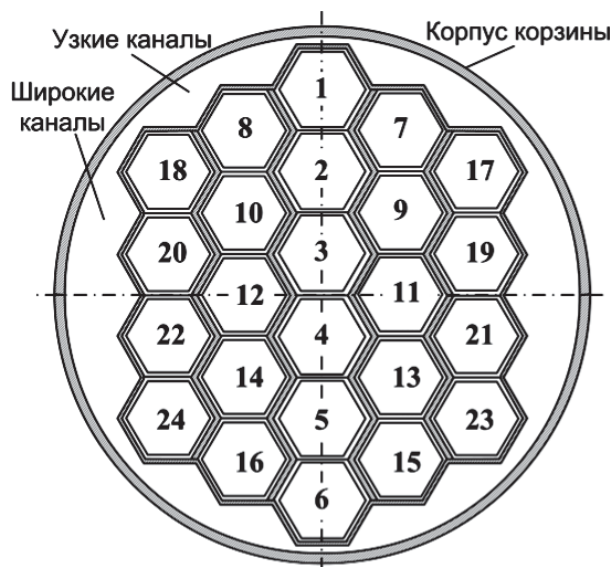


Рис. 3. Порядковые номера ОТВС в МГК

равномерно распределённым источником тепла, расположенным по высоте корзины на уровне зоны топлива.

При проведении вычислительного эксперимента мощность тепловыделения каждой ОТВС принималась равной 0,909 Вт, т. е. рассматривался момент времени, соответствующий первым месяцам хранения ОТВС в СХОЯТ после их выгрузки в контейнер из бассейна выдержки.

**Результаты и их обсуждение.** Автоматизированным подбором при минимизации функционала (1) получено значение  $\lambda_3 = 3,9 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  при уровне среднеквадратичного отклонения  $15,9^\circ\text{C}$ . Расчётные температуры в некоторых реперных точках для случая подробного учёта внутренней конструкции МГК и упрощённой геометрии при  $\lambda_3 = 3,9 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  приведены в табл. 1.

Исследовано также влияние количества реперных точек и их расположения на значение  $\lambda_3$ . Если из рассмотрения в (1) исключить реперные точки на крышке и дне МГК, то значение в пределах погрешности  $0,1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  останется неизменным. Та же картина наблюдается, если рассматривать реперные точки только на осях ОТВС и на направляющих трубах. Если из рассмотрения исключаются только реперные точки, расположенные на направляющих трубах, то найденное значение составляет  $3,8 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Если рассматривать реперные точки только на осях ОТВС, то  $\lambda_3 = 3,7 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Очевидно, это объясняется тем, что в последних двух случаях существенно искажается информация о температурном поле, которую несут реперные точки: при исключении из рассмотрения направляющих труб, температура которых на  $20\text{--}50^\circ\text{C}$  ниже температуры в центре ОТВС на том же уровне по высоте, теряется информация о существенной неравномерности температурного поля в горизонтальном сечении МГК. Таким образом, можно утверждать, что более близким к истинному является значение коэффициента эквивалентной теплопроводности корзины  $\lambda_3 = 3,9 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Отметим, что полученная в результате решения обратной сопряженной задачи теплопереноса эквивалентная теплопроводность выше, чем рассчитанная путем усреднения по объёму теплопроводностей объектов внутри МГК [5, 6]: 3,9 против  $2,025 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Такое расхождение может быть вызвано тем, что в качестве коэффициентов теплопроводности составляющих частей корзины, которые использо-

Таблица 1. Значения температуры для подробной и упрощённой геометрической модели

№ реперной точки	Температура, °С		Разность температур при использовании подробной и упрощённых геометрических моделей, °С
	при использовании подробной геометрической модели	при использовании упрощённой геометрической модели для $\lambda_3 = 3,9 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	
2	139,44	153,68	-14,24
5	203,72	192,55	11,17
9	134,34	113,63	20,71
32	147,04	163,62	-16,58
35	221,84	209,54	12,30
39	144,77	122,78	21,99
75	216,29	222,52	-6,23
95	117,88	143,37	-25,49
135	246,56	251,76	-5,20

вались в процессе вычисления эквивалентной теплопроводности путем среднеинтегрального усреднения по объёму, были взяты эквивалентные коэффициенты теплопроводности топлива и гелия, приведенные в [14]:

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·К)
Область топлива	1,04
Гелий («широкий» поток)	4,85
Гелий («узкий» поток)	0,19
Материал RX-277	1,73

Эти эмпирические значения получены компаниями Sierra Nuclear Corporation и Duke Engineering & Services (США) при испытаниях контейнера TN-24P фирмы Transnuclear с отработавшими тепловыделяющими сборками американского реактора PWR и рекомендованы разработчиками контейнеров ВКХ-ВВЭР к использованию при оценке их теплового состояния. Хотя реактор PWR близок по своим характеристикам к отечественным реакторам типа ВВЭР-1000, данные результаты следует использовать с осторожностью, так как по геометрии тепловыделяющих сборок и каналов корзины хранения контейнера TN-24P и контейнера ВКХ-ВВЭР существенно отличаются. Поэтому параметры течения гелия внутри корзины хранения, в том числе и эквивалентная теплопроводность, могут быть различными для этих двух типов контейнеров. Кроме того, в [14] для зон «узкого» потока (см. рис. 3) эквивалентная теплопроводность гелия приводится равной его чистой теплопроводности —  $0,19 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  при  $150^\circ\text{C}$ , — несмотря на то что для теплообмена между двумя твердыми поверхностями, разделёнными движущейся газообразной средой, прежде всего, характерны конвективный и лучистый механизмы переноса тепла, а не кондуктивный.

Следовательно, есть все основания полагать, что использованные ранее в расчетах [5, 6] значение коэффициента эквивалентной теплопроводности МГК, полученное усреднением по объёму, занижено по сравнению с действительным. Тем не менее, это не означает, что полученные ранее результаты по тепловому состоянию контейнеров на площадке

СХОЯТ не являются консервативными. Занижение эквивалентной теплопроводности МГК приводит к завышению максимальных температур сборок внутри неё, по которым производится оценка допустимости эксплуатации контейнеров на площадке СХОЯТ в тех или иных условиях. Таким образом, выполненные ранее исследования проведены с некоторым запасом по максимальной температуре отработавших сборок.

## Выводы

На основе решения обратной сопряжённой задачи теплопереноса разработана методика определения эквивалентной теплопроводности многоместной герметичной корзины при замене её изотропным однородным телом в упрощённой математической модели. Проведенные расчёты позволили сделать вывод, что для первых месяцев хранения ОТВС в СХОЯТ значение  $\lambda_3$  следует принимать на уровне 3,9 Вт/(м · К).

Проблема определения эквивалентной теплопроводности МГК требует дальнейшего изучения. В частности, необходимо исследовать влияние на получаемую в результате решения обратной задачи эквивалентную теплопроводность корзины следующих факторов:

изменения мощности тепловыделения ОТВС с течением времени;

неравномерности тепловыделения по сборкам, загруженным в корзину.

Кроме того, желательно спланировать и провести экспериментальные исследования на контейнерах типа ВКХ-ВВЭР.

## Список литературы

1. Алёхина С. В. Проблема экологической безопасности хранения отработавшего ядерного топлива в Украине / С. В. Алёхина, В. А. Воронина, В. Н. Голошапов, А. О. Костиков, С. А. Письменский, В. Г. Рудычев // Проблемы машиностроения. — 2008. — № 5–6. — С. 75–78.
2. Алёхина С. В. Исследование тепловых процессов при сухом хранении отработавшего ядерного топлива: актуальные проблемы и пути их решения / С. В. Алёхина, В. Н. Голошапов, А. О. Костиков // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. — 2009. — № 3. — С. 24–30.

3. Poskas P. Thermal analysis of casks for interim storage of spent nuclear fuel / P. Poskas, V. Simonis, R. Makarevicius // MECHANICS. — 1999. — No. 2 (17). — P. 47–51.

4. Ефимов В. К. 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.

5. Алёхина С. В. Решение сопряжённой задачи теплообмена при исследовании теплового состояния вентилируемого бетонного контейнера с отработавшим ядерным топливом / С. В. Алёхина, В. Н. Голошапов, А. О. Костиков, Ю. М. Мацевитый // Проблемы машиностроения. — 2005. — № 4. — С. 12–20.

6. Алёхина С. В. Тепловое состояние вентилируемого контейнера хранения отработавшего ядерного топлива в условиях натекания внешнего воздушного потока / С. В. Алёхина, В. Н. Голошапов, А. О. Костиков, Ю. М. Мацевитый // Компрессорное и энергетическое машиностроение. — Сумы, 2009.

7. Альохина С. В. Тепловий стан вентильованих контейнерів з відпрацьованими тепловидільними збірками реактора ВВЕР-1000 / С. В. Альохина, В. М. Голошапов, А. О. Костиков // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2009. — Вип. 11. — С. 36–41.

8. Бейнер К. С. Анализ безопасности ВКХ-ВВЭР 1000 // Symposium within XV international youth nuclear festival «DYSNAI». — Visaginas, 2002. — С. 22–34.

9. Fischer L. E. Qualification of independent spent fuel storage installation / L. E. Fischer, A. Howe // Nuclear Engineering and Design. — 1999. — 192, № 2–3. — P. 217–228.

10. Мацевитый Ю. М. Обратные задачи теплопроводности: В 2-х т. — Т. 1. Методология. — К.: Наук. думка, 2002. — 408 с.

11. Алифанов О. М. Обратные задачи теплообмена. — М.: Машиностроение, 1988. — 280 с.

12. Ганчин В. В. Определение теплопроводности рельефных печатных плат / В. В. Ганчин, Н. М. Курская, О. С. Цаканян // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Тепловые режимы, термостатирование и охлаждение. — 1990. — Вып. 12. — С. 12–21.

13. Мацевитый Ю. М. Обратные сопряженные задачи теплопереноса / Ю. М. Мацевитый, А. О. Костиков // Проблемы машиностроения. — 2007. — № 5. — С. 19–26.

14. Creer J. M., et. Al., The TN-24P PWR Spent-Fuel Storage Cask: Testing and Analysis, Richland, Washington: Pacific Northwest Laboratory, 1987. PNL-6054.

Надійшла до редакції 28.07.2009