

¹Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, Харків, Україна, alyokhina@ipmach.kharkov.ua

²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна, alyokhina@karazin.ua

ТЕПЛОВІ АСПЕКТИ ДЕЯКИХ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ ПРИ СУХОМУ ЗБЕРІГАННІ ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА У ВЕНТИЛЬОВАНИХ КОНТЕЙНЕРАХ

Шляхом розв'язання спряжених задач теплообміну було проаналізовано теплові процеси, що мають місце у вентильованому контейнері зберігання відпрацьованого ядерного палива за умов деяких проектних аварій. Було визначено максимальні температури при різних варіантах падіння контейнера, зсуву корзини зберігання та при екстремально низьких та високих температурах атмосферного повітря. Дослідження проведено для контейнерів, що експлуатуються на єдиному в Україні сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива на Запорізькій АЕС.

Ключові слова: відпрацьоване ядерне паливо, теплові процеси, математичне моделювання.

Вступ

Аналіз теплового стану контейнера зберігання відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) в аварійних умовах експлуатації є необхідною складовою комплексного аналізу безпеки сухого сховища відпрацьованого ядерного палива на всіх етапах його життєвого циклу. Результати такого дослідження корисні на етапі проектування при розробці заходів щодо ліквідації наслідків імовірної аварії, що сталась, або на етапі експлуатації, коли необхідно приймати заходи щодо запобігання виникненню аварійних ситуацій.

Дослідження аварійних ситуацій при сухому зберіганні ВЯП можна поділити на два типи: експериментальні [1 - 3] та чисельні [4, 5]. Перший тип досліджень, як правило, акцентується на проведенні випробувань на міцність і дуже мало уваги приділяється вимірюванням температури, їх проводять переважно для подальшої перевірки результатів комп'ютерного моделювання. Другий тип досліджень є менш затратним і більш безпечним, отже теплових досліджень більше, і в роботах розглядаються різні аварійні ситуації [6, 7].

Огляд результатів існуючих досліджень показав, що перелік імовірних аварій, які аналізуються з теплової точки зору, є обмеженим. Це, з одного боку, регламентується нормами МАГАТЕ, з іншого – малою вірогідністю виникнення деякого класу аварій для того чи іншого типу сховища або умов/регіону його експлуатації. Однак, на думку автора, перелік аварій, теплові аспекти яких доцільно проаналізувати, може бути розширений для кращого розуміння теплових процесів, що відбуваються у сховищі ВЯП, та для розробки заходів щодо запобігання їхньому виникненню або ліквідації їхніх наслідків.

Найбільше уваги серед відомих відкритих досліджень приділяється аваріям із втратою охолоджувача [3, 4, 8] або тим, де суттєво перевищуються розрахункові температури експлуатації (наприклад, [6]). Однак таким проектним аваріям, як перекидання контейнера, зсув корзини зберігання тощо, увага приділяється лише при аналізі цілісності обладнання зберігання [наприклад, 1, 9]. Зазвичай результати досліджень показують надійність обладнання і відсутність механічних пошкоджень ВЯП, що зберігається, проте питання наскільки зміняться теплові режими зберігання внаслідок аварії залишається відкритим. Аналогічна ситуація склалась і для єдиного в Україні сухого сховища ВЯП на Запорізькій АЕС, звіт про аналіз безпеки якого не містить даних щодо рівня можливих температур ВЯП за умов деяких проектних аварій [10].

Метою цієї роботи є тепловий аналіз деяких аварійних ситуацій на площадці сухого сховища ВЯП Запорізької АЕС, де експлуатуються вентильовані контейнери зберігання.

Постановка задачі

Зберігання ВЯП Запорізької АЕС відбувається на відкритому пристанційному сховищі контейнерного типу (рис. 1). Відпрацьоване паливо (24 відпрацьовані паливні збірки реактора ВВЕР-1000) розташовується у металевій герметичній корзині зберігання, яка у свою чергу розміщується в бетонному контейнері. Відведення залишкового тепла ядерного розпаду відбувається атмосферним повітрям, яке рухається внаслідок природної тяги між зовнішньою поверхнею корзини зберігання та

© С. В. Альохіна, 2018

внутрішньою поверхнею бетонного контейнера. Підвід атмосферного повітря відбувається в нижній частині контейнера через нижні вентиляційні отвори, відвід – у верхній частині через вихідні з-подібні вентиляційні отвори.

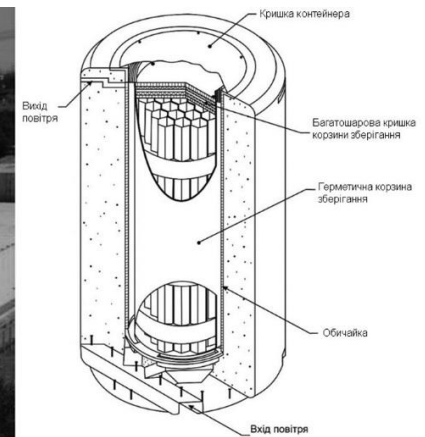


Рис. 1. Сухе контейнерне сховище відпрацьованого ядерного палива Запорізької АЕС.

Проектними тепловими критеріями безпеки [11] передбачено максимальне тепловиділення від відпрацьованої паливної збірки 0,99 Вт. Отже, при моделюванні розглядалось максимально припустиме тепловиділення та експлуатація контейнера зберігання влітку при температурі атмосферного повітря 24 °С (окрім аварій, пов'язаних із погодними факторами). Вплив сонячного випромінювання не враховувався, зважаючи на результати досліджень [12], де зазначено, що коливання температури протягом доби мають місце лише на поверхні контейнера і відсутні в корзині з ВЯП.

Оскільки більшість досліджень на міцність показали надійність контейнерів зберігання внаслідок таких проектних аварій, як падіння контейнера або землетрус, доцільно розглянути їхні результати з позиції теплової безпеки. Зазначені аварії будуть мати вплив, перш за все, на роботу вентиляційного тракту контейнера. Зважаючи на особливості конструкції вентиляційного тракту контейнера зберігання, було розглянуто аварійні ситуації.

1. Падіння контейнера зберігання.
 - 1.1. На верхній вентиляційний канал.
 - 1.2. На нижній вентиляційний канал.
 - 1.3. На проміжок між нижніми вентиляційними каналами (направляючі для транспортування розташовані перпендикулярно до поверхні площадки).
 - 1.4. На проміжок між нижніми вентиляційними каналами (направляючі для транспортування розташовані паралельно поверхні площадки).
2. Зсув корзини зберігання відносно повітропідводчиків.
 - 2.1. Корзина торкається посередині між широкими проміжками повітропідводчика.
 - 2.2. Корзина торкається посередині між вузькими проміжками повітропідводчика.
 - 2.3. Корзина торкається посередині повітропідводчика.
3. Погодні фактори.
 - 3.1. Екстремально низька температура атмосферного повітря -40 °С.
 - 3.2. Екстремально висока температура атмосферного повітря +52 °С.

При оцінці теплової безпеки зберігання ВЯП використовують установлені розробниками теплові критерії безпеки [10, 11], зокрема максимальна температура оболонок твелів не повинна перевищувати 350 °С для довгострокових режимів зберігання та 450 °С для короткострокових аномальних впливів.

Методологія розв'язання задачі

Математична модель стаціонарного теплофізичного процесу, що розглядається, включає в себе рівняння у часткових похідних [11]: нерозривності; руху в'язкої рідини Нав'є–Стокса; енергії; теплопровідності; променевого теплообміну.

Для замикання система диференціальних рівнянь доповнювалась термічним рівнянням стану, в якості якого можна взяти рівняння ідеального газу. Для обчислення турбулентних складових теплофізичних констант використовується модель турбулентності k - ϵ [13], що включає в себе два дифе-

ренційних рівняння – для турбулентної кінетичної енергії k та швидкості її дисипації ε . Вибір цієї моделі турбулентності при дослідженні теплових та газодинамічних процесів у вентильованих контейнерах зберігання ВЯП ґрунтується на результатах натурального експерименту [14].

Розрахункова область для кожного з розглянутих варіантів аварійної ситуації містила циліндричний контейнер, частку бетонної поверхні площадки зберігання, а також повітря, що оточує контейнер. На зовнішніх границях розрахункової області були задані атмосферний тиск 101325 Па та температура атмосферного повітря.

При розрахунках було прийнято припущення, що корзина зберігання розглядається як група однорідних тіл (зона тепловиділення, оголовок та хвостовик збірки, кришка корзини) з еквівалентною теплопровідністю [15]. Детальні параметри розрахункової області та рівняння математичної моделі наведені в [16].

Запропонована методологія розв'язання поставленої задачі була верифікована шляхом порівняння даних теплового моніторингу на площадці зберігання ВЯП та результатів моделювання теплових процесів у контейнері зберігання при нормальних умовах експлуатації [17]. Розбіжність становила не більше 1 град, що свідчить про адекватність запропонованої моделі та можливість її застосування для проведення подальших чисельних досліджень.

Результати

Як зазначалось вище, падіння контейнера є однією з проектних аварій, отже для декількох варіантів її розвитку було проведено тепловий аналіз контейнера з ВЯП. Структуру руху охолоджуючого повітря та його температури представлено на рис. 2 для варіантів падіння на проміжок між вентиляційними каналами. Як видно, при такому варіанті розвитку аварії вентиляційний тракт суттєво перекривається корзиною зберігання, структура руху повітря суттєво змінюється порівняно з вертикальним положенням контейнера зберігання. Корзина зберігання охолоджується частково у верхній частині, вхідні й вихідні канали одночасно працюють на підвід та відвід охолоджуючого повітря. Зважаючи на складну форму нижніх вентиляційних каналів, підвід охолоджуючого повітря значно інтенсивніший біля вихідних каналів. Температура охолоджуючого повітря при падінні контейнера на проміжок між каналами (направляючі вертикально) дещо вища (а), ніж при інших варіантах падіння, що обумовлено нерівномірним розташуванням повітропідводчиків у середині контейнера та перекриттям більшої їхньої площини корзиною зберігання.

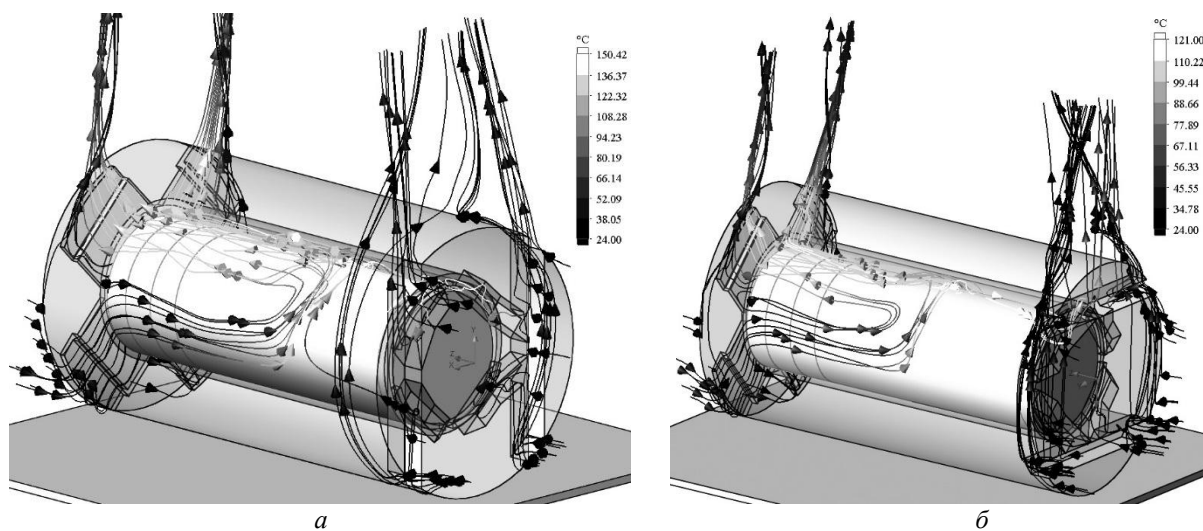


Рис. 2. Температура та структура руху охолоджуючого повітря при падінні контейнера на проміжок між каналами: направляючі для транспортування розташовані перпендикулярно до поверхні площадки (а); направляючі для транспортування розташовані паралельно поверхні площадки (б).

Зсув корзини зберігання може відбутись унаслідок, наприклад, землетрусу. Такий варіант аварійної ситуації може призвести до перекриття повітропідводчиків, тобто до погіршення роботи системи вентиляції (рис. 3). При зсуві корзини зберігання на вузький проміжок між повітропідводчиками відбувається максимальне їхнє перекриття і температури в корзині зберігання найвищі. Вентиляційне повітря у вертикальному кільцевому каналі нагрівається нерівномірно: на виході з верхніх каналів, де корзина торкається корпусу контейнера і циркуляція повітря погіршена, температура вен-

тиляційного повітря сягає $86\text{ }^{\circ}\text{C}$, у каналах із протилежного боку – $66,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. У випадку, коли корзина торкається корпусу контейнера у широкому проміжку між повітропідводчиками, максимальна температура ВЯП дещо нижча, вентиляційне повітря на виході з вентиляційного тракту нагріте більш рівномірно: $80,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ у тих каналах, біля яких корзина торкається корпусу контейнера, та $70,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ у каналах із протилежного боку.

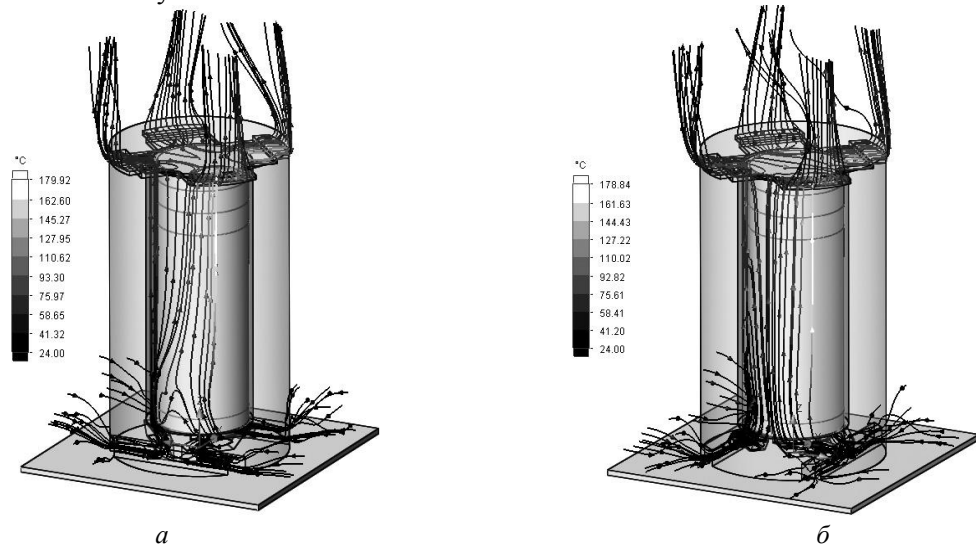


Рис. 3. Температура та структура руху охолоджуючого повітря при зсуві корзини зберігання в напрямку між вузькими проміжками повітропідводчиків (а) та між широкими проміжками повітропідводчиків (б).

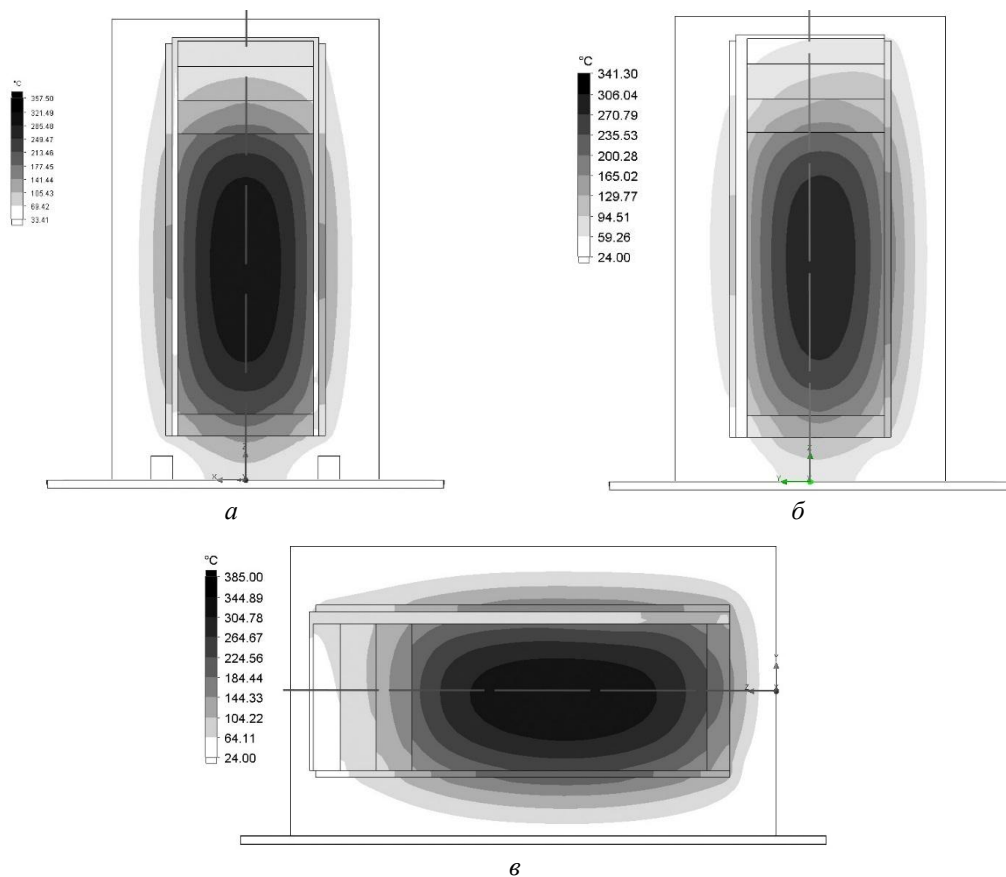


Рис. 4. Температурне поле контейнера зберігання та корзини з ВЯП при аномально високих температурах (а), зсуві корзини зберігання в напрямку між вузькими проміжками повітропідводчиків (б) та при падінні контейнера на проміжок між верхніми та нижніми вентиляційними каналами (в).

Температурні поля контейнера зберігання та ВЯП для усіх розглянутих аварій мають свої особливості (рис. 4). При впливі погодних факторів температурне поле симетричне відносно осі контейнера зберігання, бетонний контейнер прогрітий рівномірно з усіх боків (а). При зсуві корзини збе-

рігання температурне поле втрачає симетричність, контейнер прогривається більше з того боку, де корзина торкається його внутрішньої поверхні (б). При падінні контейнера температурне поле контейнера теж несиметричне, але більш рівномірне, оскільки верхня його частина прогривається більше завдяки вентиляційному повітрю (в). Однак у всіх трьох групах проектних аварій зафіксувати їх шляхом вимірювання температури поверхні контейнера зберігання неможливо, адже контейнер не прогривається повністю. Фіксація таких аварій можлива лише шляхом візуального огляду площадки зберігання (у випадку падіння контейнера) або через вимірювання температури вентиляційного повітря у кожному з вихідних каналів контейнера (у випадку зсуву корзини зберігання).

Максимальні температури при різних варіантах розглянутих проектних аварій наведено в таблиці.

Максимальні температури при аварійних ситуаціях

№ з/п	Аварійна ситуація	Максимальна температура в контейнері, °С
Падіння контейнера зберігання		
1.1	На верхній вентиляційний канал	382,4
1.2	На нижній вентиляційний канал	382,7
1.3	На проміжок між нижніми вентиляційними каналами (направляючі для транспортування розташовані перпендикулярно до поверхні площадки)	385,0
1.4	На проміжок між нижніми вентиляційними каналами (направляючі для транспортування розташовані паралельно поверхні площадки)	377,6
Зсув корзини зберігання відносно повітропідводчиків		
2.1	Корзина торкається посередині між широкими проміжками повітропідводчика	328,6
2.2	Корзина торкається посередині між вузькими проміжками повітропідводчика	341,3
2.3	Корзина торкається посередині повітропідводчика	339,7
Погодні фактори		
3.1	Екстремально низька температура атмосферного повітря -40 °С	269,0
3.2	Екстремально висока температура атмосферного повітря +52 °С	357,6

Найбільш небезпечними з теплової точки зору є аварії з падінням контейнера, у цьому випадку температури можуть перевищити ті, що встановлені тепловими критеріями безпеки.

Висновки

Огляд відкритих літературних джерел та звітів по аналізу безпеки сухих сховищ ВЯП показав, що теплові розрахунки для деяких проектних аварій відсутні.

За результатами чисельного моделювання було обчислено максимальні температури в контейнері зберігання ВЯП за умов деяких проектних аварій (падіння контейнера, зсув корзини зберігання, погодні фактори) та визначено, що падіння контейнера є найбільш небезпечним із теплової точки зору і рівень максимальних температур може перевищити припустимий – 350 °С.

У разі виникнення надзвичайної ситуації та за умови збереження цілісності основного обладнання зберігання ліквідація її наслідків повинна відбуватись відповідно до результатів теплових розрахунків: першочергово для контейнерів, що впали; тепловідвід шляхом конвекції повинен бути відновлений або організовано додаткове охолодження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Experimental studies on safety of dry cask storage technology of spent fuel allowable temperature of cladding and integrity of cask under accidents* / T. Saegusa, M. Mayuzumi, C. Ito, K. Shirai // *Journal of Nuclear Science and Technology*. – 1996. – Vol. 33, Iss. 3. – P. 250 – 258.
2. *Chahi H. Thermal-hydraulic investigations on the flow of model gases at a PWR fuel assembly dummy and overflow of air above the top of the dummy* / H. Chahi, W. Kästner, S. Alt // *International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE-2016*. Vol. 3, 2016, Charlotte, United States.
3. *Experimental investigation of heat removal performance of a concrete storage cask* / Y. Zhang, Y. Ouyang, Y. Zhou, J. Liu // *Annals of Nuclear Energy*. – 2 September 2014. – Vol. 85. – P. 679 – 686.
4. *Modeling of heatmasstransfer in "wet" and "dry" storages for spent nuclear fuel* / E. D. Fedorovich, Y. E. Karyakin, V. E. Mikhailov, V. O. Astafieva, A. A. Pletnev // *14th International Heat Transfer Conference, ІНТС 14*. Vol. 7, 2010, P. 303 – 310.

5. *CFD analyses of the TN-24P PWR spent fuel storage cask* / R. A. Brewster, E. Baglietto, E. Volpenhein, C. S. Bajwa // ASME-2012 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP 2012; Toronto, ON; Canada. Vol. 3, 2012, P. 17 – 25.
6. *Lo Frano R. Thermal analysis of a spent fuel cask in different transport conditions* / R. Lo Frano, G. Pugliese, G. Forasassi // Energy. – April 2011. – Vol. 36, Iss. 4. – P. 2285 – 2293.
7. *Pugliese G. Spent fuel transport cask thermal evaluation under normal and accident conditions* / G. Pugliese, R. L. Frano, G. Forasassi // Nuclear Engineering and Design. – 2010. – Vol. 240, Iss. 6. – P. 1699 – 1706.
8. *Accident safety evaluation method for spent fuel dry storage facilities* / Y. Zhang, Y. Ouyang, Y. Zhou, J. Liu // International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE-2017. Vol. 7, 2017.
9. *Testing of Metal Cask and Concrete Cask* / K. Shirai, M. Wataru, H. Takeda, J. Tani, T. Arai, T. Saegusa (2015) // Proceedings of an International Conference Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors. International Atomic Energy Agency (IAEA): IAEA.
10. *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.
11. *Безопасность сухого хранения отработавшего ядерного топлива* / В. Г. Рудычев, С. В. Алёхина, В. Н. Голошапов и др. / Под общей ред. акад. НАН Украины Ю. М. Мацевитого, чл.-кор. НАН Украины И. И. Залюбовского. – Харьков : ХНУ имени В. Н. Каразина, 2013. – 200 с.
12. *Alyokhina S. Solar Radiation Influence on the Spent Nuclear Fuel Dry Storage Container* / S. Alyokhina, S. Kapuzza, A. Kostikov // Problems of Atomic Science and Technology (PAST). – 2018. – Vol. 2(114). – P. 57 – 62.
13. *Launder B. E. The Numerical Computation of Turbulent Flow* / B. E. Launder, D. B. Spalding // Comp. Meth. Appl. Eng. – 1974. – № 3. – P. 269 – 289.
14. *Thermal hydraulic analysis compared with tests of full-scale concrete casks* / M. Wataru, H. Takeda, K. Shirai, T. Saegusa // Nuclear Engineering and Design. – 2008. – № 238. – P. 1213 – 1219.
15. *Alyokhina S. Equivalent thermal conductivity of the storage basket with spent nuclear fuel of VVER-1000 reactors* / S. Alyokhina, A. Kostikov // Kerntechnik. – 2014. – Vol. 79, No. 6. – P. 484 – 487, DOI: 10.3139/124.110443.
16. *Simulation of thermal state of containers with spent nuclear fuel: multistage approach* / S. Alyokhina, V. Goloshchapov, A. Kostikov, Yu. Matsevity // International Journal of Energy Research. – 2015. – Vol. 39, Iss. 14, Nov. – P. 1917 – 1924, DOI: 10.1002/er.3387.
17. *Alyokhina S. Unsteady heat exchange at the dry spent nuclear fuel storage* / S. Alyokhina, A. Kostikov // Nuclear Engineering and Technology. – 2017. – Vol. 49, Iss. 7, Oct. – P. 1457 – 1462, DOI: 10.1016/j.net.2017.07.029.

С. В. Алёхина^{1,2}

¹*Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, alyokhina@ipmach.kharkov.ua*

²*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, alyokhina@karazin.ua*

ТЕПЛОВЫЕ АСПЕКТЫ НЕКОТОРЫХ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИ СУХОМ ХРАНЕНИИ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА В ВЕНТИЛИРУЕМЫХ КОНТЕЙНЕРАХ

Путем решения сопряженных задач теплообмена были проанализированы тепловые процессы, которые имеют место в вентилируемых контейнерах хранения отработавшего ядерного топлива в условиях некоторых проектных аварий. Были определены максимальные температуры при различных вариантах падения контейнера, сдвиге корзины хранения и при экстремально низких и высоких температурах атмосферного воздуха. Исследования проведены для контейнеров, которые эксплуатируются на единственном в Украине сухом хранилище отработавшего ядерного топлива на Запорожской АЭС.

Ключевые слова: отработавшее ядерное топливо, тепловые процессы, математическое моделирование.

S. V. Alyokhina^{1,2}

¹*A. Podgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, alyokhina@ipmach.kharkov.ua*

²*V. N. Karazin Kharkiv National University, alyokhina@karazin.ua*

THERMAL ASPECTS OF SOME ACCIDENT CONDITIONS AT THE DRY SPENT NUCLEAR FUEL STORAGE IN THE VENTILATED CONTAINERS

The analysis of thermal state of storage container for spent nuclear fuel under accident conditions is main part of the complex safety analysis of the dry spent nuclear fuel storage facility on all stages of its lifecycle. As literatures review shown, the thermal analysis of some accidents was not carried out. In the work by solving of the conjugate heat transfer problems the thermal processes in ventilating storage containers for spent nuclear fuel under some design basis accidents were analyzed. The maximum temperatures at different variants of the container's falls, storage cask displacement and at extremely high and low ambient temperatures were calculated. The most dangerous accidents from the

thermal point of view are accidents with container's falls. In this case, the maximum temperatures of fuel can be higher than allowable by safety criteria temperatures. Consequences of the accidents with container's falls should be removed in the first instance; heat removing by natural convection should be restored or additional cooling should be organized. As results shown, none of considered accidents could be detected by container surface temperature measurement because container is not warmed-up fully. Accidents can be detected by visual monitoring (at container's falls) or by measurement of the ventilating air temperature (at the storage cask displacement). The studies were carried out for containers, which are operated on the unique in Ukraine the Dry Spent Nuclear Fuel Storage Facility on the Zaporizhka NPP.

Keywords: spent nuclear fuel, thermal processes, mathematical modelling.

REFERENCES

1. *Experimental studies on safety of dry cask storage technology of spent fuel allowable temperature of cladding and integrity of cask under accidents* / T. Saegusa, M. Mayuzumi, C. Ito, K. Shirai // *Journal of Nuclear Science and Technology*. – 1996. – Vol. 33, Iss. 3. – P. 250 – 258.
2. *Chahi H.* Thermal-hydraulic investigations to the flow of model gases at a PWR fuel assembly dummy and overflow of air above the top of the dummy / H. Chahi, W. Kästner, S. Alt // *International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE-2016*. Vol. 3, 2016, Charlotte, United States.
3. *Experimental investigation of heat removal performance of a concrete storage cask* / Y. Zhang, Y. Ouyang, Y. Zhou, J. Liu // *Annals of Nuclear Energy*. – 2 September 2014. – Vol. 85. – P. 679 – 686.
4. *Modeling of heatmasstransfer in "wet" and "dry" storages for spent nuclear fuel* / E. D. Fedorovich, Y. E. Karyakin, V. E. Mikhailov, V. O. Astafieva, A. A. Pletnev // *14th International Heat Transfer Conference, IHTC 14*. Vol. 7, 2010, P. 303 – 310.
5. *CFD analyses of the TN-24P PWR spent fuel storage cask* / R. A. Brewster, E. Baglietto, E. Volpenhein, C. S. Bajwa // *ASME-2012 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP 2012*; Toronto, ON; Canada. Vol. 3, 2012, P. 17 – 25.
6. *Lo Frano R.* Thermal analysis of a spent fuel cask in different transport conditions / R. Lo Frano, G. Pugliese, G. Forasassi // *Energy*. – April 2011. – Vol. 36, Iss. 4. – P. 2285 – 2293.
7. *Pugliese G.* Spent fuel transport cask thermal evaluation under normal and accident conditions / G. Pugliese, R. L. Frano, G. Forasassi // *Nuclear Engineering and Design*. – 2010. – Vol. 240, Iss. 6. – P. 1699 – 1706.
8. *Accident safety evaluation method for spent fuel dry storage facilities* / Y. Zhang, Y. Ouyang, Y. Zhou, J. Liu // *International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE-2017*. Vol. 7, 2017.
9. *Testing of Metal Cask and Concrete Cask* / K. Shirai, M. Wataru, H. Takeda, J. Tani, T. Arai, T. Saegusa (2015) // *Proceedings of an International Conference Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors*. International Atomic Energy Agency (IAEA): IAEA.
10. *Safety Analysis report for Dry Spent Nuclear Fuel Storage Facility of Zaporizhka NPP. Version 3.01.1 / SE «Zaporizhka NPP»*. - Inv. No. 1526(3). – Energodar, 2008. – 624 p. (Rus)
11. *Spent Nuclear Fuel Dry Storage Safety* / V. G. Rudychev, S. V. Alyokhina, V. N. Goloschapov et al. ; Edited by acad. NAS of Ukraine Yu. M. Matsevity and corr. member of NAS of Ukraine I. I. Zalubovsky. – Kharkiv, 2013. – 200 p. (Rus)
12. *Alyokhina S.* Solar Radiation Influence on the Spent Nuclear Fuel Dry Storage Container / S. Alyokhina, S. Kapuzza, A. Kostikov // *Problems of Atomic Science and Technology (PAST)*. – 2018. – Vol. 2(114). – P. – 57 – 62.
13. *Launder B. E.* The Numerical Computation of Turbulent Flow / B. E. Launder, D. B. Spalding // *Comp. Meth. Appl. Eng.* – 1974. – № 3. – P. 269 – 289.
14. *Thermal hydraulic analysis compared with tests of full-scale concrete casks* / M. Wataru, H. Takeda, K. Shirai, T. Saegusa // *Nuclear Engineering and Design*. – 2008. – № 238. – P. 1213 – 1219.
15. *Alyokhina S.* Equivalent thermal conductivity of the storage basket with spent nuclear fuel of VVER-1000 reactors / S. Alyokhina, A. Kostikov // *Kerntechnik*. – 2014. – Vol. 79, No. 6. – P. 484 – 487, DOI: 10.3139/124.110443.
16. *Simulation of thermal state of containers with spent nuclear fuel: multistage approach* / S. Alyokhina, V. Goloschapov, A. Kostikov, Yu. Matsevity // *International Journal of Energy Research*. – 2015. – Vol. 39, Iss. 14, Nov. – P. 1917 – 1924, DOI: 10.1002/er.3387.
17. *Alyokhina S.* Unsteady heat exchange at the dry spent nuclear fuel storage / S. Alyokhina, A. Kostikov // *Nuclear Engineering and Technology*. – 2017. – Vol. 49, Iss. 7, Oct. – P. 1457 – 1462, DOI: 10.1016/j.net.2017.07.029.

Надійшла 16.05.2018
Received 16.05.2018