С. В. Альохіна^{1,2}, А. О. Костіков¹,
Д. І. Луньов², О. М. Дибач³, Д. О. Дімітрієва³

¹Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного
НАН України, Харків, Україна

²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
Харків, Україна

³Державне підприємство «Державний науково-технічний
центр з ядерної та радіаційної безпеки», Київ, Україна

Визначення взаємного теплового впливу контейнерів з відпрацьованим ядерним паливом на відкритій площадці зберігання

У роботі шляхом розв'язання спряжених задач теплообміну проаналізовано теплові процеси, що мають місце у групі вентильованих контейнерів зберігання відпрацьованого ядерного палива, які розташовані на відкритій площадці сухого сховища. Розглянуто ряд контейнерів, що піддаються вітровому впливу, та визначено характер течії вентиляційного повітря в середині контейнерів. Показано, що у штільових умовах та при наявності вітрового впливу контейнери не мають взаємного теплового впливу, тобто гаряче повітря, що виходить з кожного контейнера не потрапляє в середину сусідніх контейнерів. За результатами моделювання були визначені граничні умови на вході до вентиляційного тракту контейнерів для подальшого застосування ітераційної методології аналізу теплових процесів при зберіганні ВЯП. Запропоновано методологію розміщення контейнерів для зменшення впливу вітру протягом усього терміну зберігання ВЯП. Дослідження проведені для контейнерів, що експлуатуються в сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива на Запорізькій АЕС.

Ключові слова: відпрацьоване ядерне паливо, теплові процеси, математичне моделювання, вентильовані контейнери

Питання поводження з відпрацьованим ядерним паливом (ВЯП) є актуальним для України, оскільки наша країна не має замкненого ядерного паливного циклу. Сьогодні в Україні функціонує єдине сухе сховище відпрацьованого ядерного палива (ССВЯП) на Запорізькій АЕС. Безпека його експлуатації є комплексним поняттям [1] і вимагає, серед іншого, дотримання температурних критеріїв безпеки тривалого зберігання ВЯП. Оскільки експлуатація сховищ, зазвичай, планується на період в декілька десятків років, умови зберігання, теплофізичні властивості матеріалів основного обладнання та ВЯП, а також його енергетичні характеристики змінюються досить суттєво. Через це виникають задачі розв'язання проблем у сфері теплового моніторингу й управління старінням обладнання та ВЯП, що неможливе без детального вивчення та узагальнення характеру перебігу теплових процесів.

Робіт щодо аналізу теплового стану контейнерів з ВЯП відомо досить багато [2–6]. Однак особливістю їх є те, що теплові розрахунки проводяться для одного контейнера в певних умовах експлуатації. Проте зберігання ВЯП, зазвичай, відбувається у контейнерах, які розташовані групами на майданчику сховища, отже постає задача теплового аналізу групи контейнерів та визначення їх взаємного впливу. Нажаль, робіт у цьому напрямку мало.

Наприклад, у роботах [7, 8] розглянуто групу контейнерів та їх взаємний тепловий вплив, при цьому кожен з контейнерів представлено суцільним тілом, яке виділяє певну кількість тепла. Автори одночасно моделюють усі контейнери, встановлення яких передбачено проектною потужністю сховища. Такий підхід потребує значну кількість розрахункових ресурсів та у результаті моделювання не дає інформації щодо температур палива, яке розташоване всередині. Часто при аналізі теплового стану об'єкта зберігання ВЯП застосовують також розрахункові коди із зосередженими параметрами [9], але недоліком цього підходу також є відсутність даних про тепловий стан кожної з паливних збірок. Разом із цим у відкритій літературі відсутні дані про вплив зовнішніх погодних факторів на тепловий стан контейнерів з ВЯП та аналіз взаємного впливу контейнерів в різних умовах експлуатації. Так, наприклад, у роботах [10, 11] було показано необхідність проведення теплових досліджень за умови впливу вітрового потоку, а у роботі [12] визначено вплив вітру на окремо розташований контейнер. Однак теплового аналізу групи контейнерів з можливістю подальшого використання результатів для обчислення температур паливних збірок проведено не було.

Зважаючи на вищевикладене, метою цієї роботи є дослідження взаємного впливу вентильованих контейнерів зберігання відпрацьованого ядерного палива на відкритій площадці ССВЯП Запорізької АЕС.

Постановка задачі

Зберігання ВЯП реакторів ВВЕР-1000 на Запорізькій АЕС здійснюється у вентильованих контейнерах на відкритій пристанційній площадці сховища [13] (рис. 1). Площадка розрахована на розташування 380 контейнерів, загальна ємність яких забезпечить зберігання ВЯП Запорізької АЕС протягом усього терміну її експлуатації.

Оскільки найбільш небезпечним з теплової точки зору є початковий період зберігання, потужність залишкового тепловиділення від кожного з контейнерів приймалась рівною 24 кВт, що відповідає потужності тепловиділення

Рис. 1 — Схема площадки зберігання ВЯП на Запорізькій АЕС

в момент завантаження палива до контейнера зберігання [14]. Взаємний вплив контейнерів досліджувався при середній денній температурі влітку, яка дорівнювала 24 °С, та при швидкості вітру 5 м/с, що є найбільш типовою швидкістю вітрового потоку для регіону розташування Запорізької АЕС.

Методологія розв'язання задачі

Для визначення теплового стану контейнера зберігання застосовувалася математична модель спряженого теплообміну [13], валідація моделі та верифікація результатів була проведена у [15]. Геометричні розміри об'єкта дослідження не дозволяють безпосередньо застосовувати сіткові методи. Тому для розв'язання задачі застосовувався ітераційний

підхід із використанням моделей різного рівня складності [16]: в моделях низького рівня геометрія об'єкта і теплофізичні процеси розглядалися в спрощеній постановці і використовувалася груба різницева сітка, а для складових об'єкта будувалися моделі високого рівня (з більшою геометричною деталізацією і докладним врахуванням теплофізичних процесів). Розрахунки проводилися шляхом ітераційного процесу змінного використання моделей низького та високого рівня, в ході якого уточнювались параметри, що зв'язують ці моделі, а саме — результати розрахунку на моделях низького рівня дозволяють сформулювати граничні умови для моделей високого рівня, а на основі температурних полів, що отримані з використанням моделей високого рівня, ідентифікуються еквівалентні теплофізичні властивості для моделей низького рівня. На рис. 2 схематично наведено порядок розрахунку з використанням

Рис. 2 — Схема ітераційної методології дослідження теплових процесів в ССВЯП

п'яти рівнів математичних моделей, кожен з яких відображений у вигляді прямокутника. Овалами позначено параметри, якими моделі обмінюються між собою.

В даній роботі розглянуто групу контейнерів, кожен з яких представлений бетонною оболонкою та вентиляційним трактом, що відповідає першому етапу методології. Група контейнерів розглядалась в штильових умовах та під впливом вітрового потоку.

Результати

За умови відсутності вітрового потоку вентиляційне повітря вільно виходить з каналів контейнера (рис. 3) та не змішується з вентиляційним повітрям сусідніх контейнерів. На виході з каналів контейнера температура вентиляційного повітря складає близько 70 °С.

При впливі вітрового потоку на групу контейнерів відбувається зміна структури потоку у вентиляційному тракті контейнерів — виникають вихори та частина повітря проходить наскрізь через верхні вентиляційні канали (рис. 4). Максимальна температура на виході з вентиляційних каналів не перевищує 80 °С.

При натіканні вітрового потоку на велику групу контейнерів найменшому впливу вітру підлягають контейнери, що розташовані в середині групи, оскільки швидкість вітру в проміжках між контейнерами менше ніж в основному потоці вітра, відповідно і температурне поле вентиляційного повітря на виходах з контейнера більш рівномірне (рис. 5). Для контейнерів з краю групи (особливо зі сторони натікання вітрового потоку) видно суттєву різницю між температурами у каналах з навітренної та підвітренної сторін.

Для реалізації другого етапу ітераційної методології (дослідження теплового стану окремого контейнера з ВЯП) були визначені граничні умови на вході в вентиляційний тракт контейнера зберігання ВЯП при натіканні вітру на ряд з 10 контейнерів. Так, у групі контейнерів можна виділити контейнери, що розташовані з навітренної та підвітренної сторони, а також у центрі групи. Для кожного з контейнерів слід також розрізняти навітренні та підвітренні входи вентиляційної системи. У всіх вхідних каналах немає зворотнього руху повітря крізь вентиляційний тракт контейнера, тобто повітря поступає в середину

Рис. 3 — Структура руху та температура охолоджуючого повітря в контейнерах зберігання за штильових умов зберігання

Рис. 4 — Структура руху та температура охолоджуючого повітря в контейнерах зберігання при повздовжньому натіканні вітрового потоку швидкістю 5 м/с

Рис. 5 — Температурне поле повітря в горизонтальному перерізі на рівні вихідних вентиляційних каналів контейнерів при натіканні вітрового потоку швидкістю 5 м/с

контейнера. Для усіх контейнерів групи швидкість повітря у підвітрених вхідних вентиляційних каналах складає близько 35 % від швидкості вітру. Швидкість входу повітря (у відсотках від швидкості вітру) у навітрених каналах змінюється в залежності від місця розташування контейнера: 86 % для навітреного контейнера, 73 % для другого, 58 % для третього та 48 % для підвітреного (четвертого) контейнеру. Температура повітря для усіх вхідних каналів залишається незмінною і дорівнює температурі атмосферного повітря.

Висновки

1. При оцінці теплової безпеки сухого зберігання ВЯП у відкритому контейнерному сховищі доцільно застосовувати ітераційну методологію моделювання теплового стану ВЯП, оскільки вона дозволяє оцінювати взаємний вплив контейнерів зберігання та враховувати вплив зовнішніх факторів. За результатами проведених розрахунків були визначені теплові поля вентиляційного повітря та структура його руху в кожному з контейнерів. Для подальшого застосування ітераційної методології визначення теплового стану ВЯП були обчислені граничні умови (швидкість вітру та температура) повітря на вході у систему вентиляції. Показано, що температура на вході у вентиляційні канали дорівнює температурі атмосферного повітря, тобто сусідні контейнери не мають взаємного теплового впливу. Однак, слід зазначити, що існує аеродинамічний вплив від сусідніх контейнерів, який призводить до зміни швидкості повітря на вході у вентиляційні канали в залежності від розташування контейнера у групі, внаслідок чого температурний стан контейнерів навіть однаково завантажених може бути різним. Такий феномен є предметом наступних досліджень авторів.

2. Зважаючи на характер обтікання групи контейнерів вітровим потоком, для зменшення впливу вітру на тепловий стан ВЯП контейнери з найбільш гарячим паливом слід розміщувати у середині групи. Така методологія розташування контейнерів зменшить рівень радіаційного випромінювання за межами площадки зберігання, а контейнери, що будуть розташовані в середині групи будуть мати менший вплив від натікання вітрового потоку.

Робота виконана в Інституті проблем машинобудування ім. А.М.Підгорного НАН України в рамках цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Наукове забезпечення розвитку ядерно-енергетичного комплексу та перспективних ядерних технологій» та Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна, за часткової підтримки Міжнародної агенції з атомної енергії (МАГАТЕ) у рамках проекту CRP-20605 (SPAR-IV).

Список використаної літератури

1. Носовский А. В., Васильченко В. Н., Павленко А. А., Письменный Е. Н., Широков С. В. Введение в безопасность ядерных технологий. / под ред. А. В. Носовского. Киев: Техника, 2006. 360 с.
2. Lee S. Y. Heat Transfer Modeling of Dry Spent Nuclear Fuel Storage Facilities, proceedings of 1999 ASME National Heat Transfer Conf. (Albuquerque, 15–17 August 1999). Albuquerque, 1999. P. 53–59.
3. Chalasani N. R., Greiner M. Natural convection/radiation heat transfer simulations of enclosed array of vertical rods. *Packaging,*

Transport, Storage & Security of Radioactive Material. 2009. Vol. 20, No. 3. P.117–125. doi: 10.1115/pvp2006-icpvt-11–93734

4. Kwon Y. J. Finite Element Analysis of Transient Heat Transfer in and Around a Deep Geological Repository for a Spent Nuclear Fuel Disposal Canister and the Heat Generation of the Spent Nuclear Fuel. *Nuclear Sci. and Eng.* 2010. Vol. 164, №. 3. P. 264–286. doi: dx.doi.org/10.13182/NSE09-11

5. Burnham Ch., Dreifke M., Ahn Ch., Shell D., Giminaro A., Shanahan M. Spent Nuclear Fuel Storage in a Molten Salt Pool: Honors Thesis Projects / University of Tennessee. Knoxville, 2012. 43 p.

6. Poskas R., Simonis V., Poskas P., Sirvydas A. Thermal analysis of CASTOR RBMK-1500 casks during long-term storage of spent nuclear fuel. *Annals of Nuclear Energy.* 2017. № 99. P. 40–46. doi: 10.1016/j.anucene.2016.09.031

7. Ikonen K. Thermal Dimensioning of Spent Fuel Repository. *Posiva*, 2009. 64 p.

8. Амосов П. В., Подшивалова А. В. Особенности теплового режима подземного объекта изоляции тепловыделяющих материалов (контейнерный вариант). *Известия вузов. Ядерная энергетика.* 2010. № 3. С. 133–140.

9. Graževičius A., Kaliatka A. Modelling of the spent fuel heat-up in the spent fuel pools using one-dimensional system codes and CFD codes. *Kerntechnik.* 2017. №82(3). P. 316–333.

10. Альохіна С. В., Голошапов В. М., Костіков А. О., Клімов С. П., Лучна Г. Є., Мороз В. А. Аналіз умов зберігання відпрацьованого ядерного палива на майданчику сухого сховища. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля.* 2010. Вип. 13. С. 76–83.

11. Alyokhina S., Kostikov A., Kruhlov S. Safety Issues Of The Dry Storage Of The Spent Nuclear Fuel. *Problems Of Atomic Science And Technology (PAST).* 2017. № 2(108). P. 70–74.

12. Alyokhina S.V., Goloschapov V. N., Kostikov A. O., Matsevit Yu. M. Thermal state of ventilated concrete cask with spent nuclear fuel in the conditions of exterior airflow leaking. *Nuclear Physics and Atomic Energy.* 2009, V. 10, No.2. С. 171–177.

13. Рудычев В. Г., Алехина С. В., Голошапов В. Н. и др. Безопасность сухого хранения отработавшего ядерного топлива. / под общ. ред. акад. НАН Украины Ю. М. Мацевитого, чл.-кор. НАН Украины И. И. Залюбовского. Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина. 2013. 200 с.

14. Zalyubovskii I. I., Pismenetskii S. A., Rudychev V. G., Klimov S. P., Luchnaya A. E., Rudychev E. V. External radiation of a container used for dry storage of spent WWER-1000 nuclear fuel from the Zaporozhie nuclear power plant. *Atomic Energy.* 2011. V. 109, № 6, p. 396–403, doi: 10.1007/s10512-011–9374-8.

15. Alyokhina S., Kostikov A. Unsteady heat exchange at the dry spent nuclear fuel storage. *Nuclear Engineering and Technology.* 2017. V.49, №7. P. 1457–1462, doi: 10.1016/j.net.2017.07.029

16. Alyokhina S., Goloschapov V., Kostikov A., Matsevit Yu. Simulation of thermal state of containers with spent nuclear fuel: multistage approach. *International Journal of Energy Research.* 2015. №39 (14). P.1917–1924, DOI: 10.1002/er.3387

References

1. Nosovskiy A., Vasilchenko V., Pavlenko A. and others. Introduction into Nuclear Safety Technologies. [Vvedenie v bezopasnost iadernykh tekhnologiy]/ edited by Nosovskiy A. K.: Tekhnika. 2006. 360 p. (Rus)
2. Lee S. Y. Heat Transfer Modeling of Dry Spent Nuclear Fuel Storage Facilities, proceedings of 1999 ASME National Heat Transfer Conf. (Albuquerque, 15–17 August 1999). Albuquerque, 1999. P. 53–59.
3. Chalasani N. R., Greiner M. Natural convection/radiation heat transfer simulations of enclosed array of vertical rods. *Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material.* 2009. Vol. 20, No. 3. P.117–125. doi: 10.1115/pvp2006-icpvt-11–93734
4. Kwon Y. J. Finite Element Analysis of Transient Heat Transfer in and Around a Deep Geological Repository for a Spent Nuclear Fuel Disposal Canister and the Heat Generation of the Spent Nuclear Fuel. *Nuclear Sci. and Eng.* 2010. Vol. 164, No. 3. P. 264–286. doi: dx.doi.org/10.13182/NSE09-11

5. Burnham Ch., Dreifke M., Ahn Ch., Shell D., Giminaro A., Shanahan M. Spent Nuclear Fuel Storage in a Molten Salt Pool: Honors Thesis Projects / University of Tennessee. Knoxville, 2012. 43 p.

6. Poskas R., Simonis V., Poskas P., Sirvydas A. Thermal analysis of CASTOR RBMK-1500 casks during long-term storage of spent nuclear fuel. *Annals of Nuclear Energy*. 2017. No. 99. P. 40–46. doi: 10.1016/j.anucene.2016.09.031

7. Ikonen K. Thermal Dimensioning of Spent Fuel Repository. Posiva, 2009. 64 p.

8. Amosov P.V., Podshivalova A.V. Peculiarities of the Thermal Mode of Underground Isolation Facility for Heat Generating Materials (Container Option). [Osobennosti teplovogo rezhyma podzemnogo objekta izolyatsyi teplovyydeliushchikh materialov (konteineri variant)] *Editorial board of journal «Izvestia Visshikh Uchebnikh Zavedeniy. Yadernaya Energetika»*. 2010. No. 3. P. 133–140.

9. Graževičius A., Kaliačka A. Modelling of the Spent Fuel Heat-up in the Spent Fuel Pools Using One-dimensional System Codes and CFD Codes. *Kerntechnik*. 2017. No. 82(3). P. 316–333.

10. Alyokhina S. V., Goloschapov V. M., Kostikov A. O., Klimov S. P., Luchna A. E., Moroz V. A. Analysis of Storage Conditions of the Spent Nuclear Fuel on the dry Storage Site. [Analiz umov zberihannya vidpratsiovanoho iadernoho palyva na maidanchyku sukhoho skhovyscha]. *Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chernobyl*. 2010. Vol. 13, P. 76–83.

11. Alyokhina S., Kostikov A., Kruhlov S. Safety Issues of the Dry Storage of Spent Nuclear Fuel. [Voprosy bezopasnosti suhogo khranilischa otrabotannogo iadernogo topliva] *Problems of Atomic Science and Technology (PAST)*. 2017. No. 2(108). P. 70–74.

12. Alyokhina S.V., Goloschapov V. N., Kostikov A. O., Matsevyt Yu. M. Thermal State of Ventilated Concrete Cask with Spent Nuclear Fuel under the Conditions of Exterior Airflow Leaking. [Teplovoie sostoianniye ventiliruemogo konteynera khraneniia otrabotavshogo iadernogo topliva v usloviakh natekaniia vneshnego vozdushnogo potoka]. *Nuclear Physics and Atomic Energy*. 2009, V. 10, No. 2. C. 171–177.

13. Rudychev V. G., Alyokhina S. V., Goloschapov V. N. et al. Spent Nuclear Fuel Dry Storage Safety [Bezopasnost khraneniia otrabotavshogo iadernogo topliva] / edited by acad. NAS of Ukraine Yu. M. Matsevyt and corr. member of NAS of Ukraine I. I. Zalubovsky. Kharkiv. V. N. Karazin Kharkiv National University. 2013. 200 p. (Rus)

14. Zalyubovskii I. I., Pismenetskii S. A., Rudychev V. G., Klimov S. P., Luchnaya A. E., Rudychev E. V. External Radiation of a Container Used for Dry Storage of Spent WVER-1000 Nuclear Fuel From Zaporizhzhya Nuclear Power Plant. *Atomic Energy*. 2011. V. 109, No. 6, p. 396–403, doi: 10.1007/s10512-011-9374-8.

15. Alyokhina S., Kostikov A. Unsteady Heat Exchange at the Dry Spent Nuclear Fuel Storage. *Nuclear Engineering and Technology*. 2017. V.49, No. 7. P. 1457–1462, doi: 10.1016/j.net.2017.07.029

16. Alyokhina S., Goloschapov V., Kostikov A., Matsevyt Yu. Simulation of Thermal State of Containers with Spent Nuclear Fuel: Multistage Approach. *International Journal of Energy Research*. 2015. No. 39 (14). P.1917–1924, DOI: 10.1002/er.3387

S. Alyokhina^{1,2}, A. Kostikov¹, D. Lunov², O. Dybach³, D. Dimitriiieva³

¹ A.Podgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

² V.N.Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

³ State Enterprise "Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety", Kyiv, Ukraine

Definition of mutual thermal influence of containers with spent nuclear fuel at the open storage site

The problem of spent nuclear fuel handling in Ukraine is a key issue. A half of spent nuclear fuel is currently stored in Ukraine at the open-site dry storage facility at Zaporizhzhya NPP. Thermal safety analysis should be performed as a part of the storage facility safety assessment. Thermal analysis of a container group is a poorly investigated area. As literature

review shows, current results do not clearly identify mutual influence of the containers and influence of weather conditions on the thermal condition of stored spent nuclear fuel. This type of analysis could be performed using the multi-stage methodology proposed by the authors. Thus, mutual thermal influence of the containers and boundary conditions at the inlets to the ventilation duct of each storage container should be identified. Thermal processes in the container group where spent nuclear fuel is stored that are described in this paper are analyzed by solving the conjugate heat transfer problems. A row of containers under wind influence is simulated and the structure of ventilation airflow inside the containers is identified. The mutual thermal influence of the containers is absent under calm conditions, and heated air does not come from one container to another. Resulting from the simulation, boundary conditions at the inlet of the ventilation duct are specified and can be used in the iterative modelling methodology for spent fuel thermal condition. The dependence of the velocity of the inlet ventilation air in the ventilation duct of each container in the row was defined. The container placement methodology with the purpose of decreasing the wind influence on the thermal condition of spent fuel storage was proposed. Thermal studies are carried out for the containers and storage conditions of the dry spent nuclear storage facility at Zaporizhzhya NPP.

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

С. В. Альохина^{1,2}, А. О. Костиков¹, Д. И. Луньов², А. М. Дибач³, Д. А. Димитриева³

¹ Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков, Украина

² Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, г. Харьков, Украина

³ Государственное предприятие «Государственный научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Киев, Украина

Определения взаимного теплового воздействия контейнеров с отработавшим ядерным топливом на открытой площадке хранения

В работе путем решения сопряженных задач теплообмена проанализированы тепловые процессы, имеющие место в группе вентилируемых контейнеров хранения отработавшего ядерного топлива, расположенных на открытой площадке сухого хранилища. Рассмотрен ряд контейнеров, которые подвергаются ветровому влиянию, и определен характер течения вентиляционного воздуха внутри контейнеров. Показано, что в штилевых условиях и при наличии ветрового воздействия контейнеры не имеют взаимного теплового влияния, то есть горячий воздух, выходящий из каждого контейнера, не попадает внутрь соседних контейнеров. По результатам моделирования были определены граничные условия на входе в вентиляционный тракт контейнеров для дальнейшего применения итеративной методологии анализа тепловых процессов при хранении отработавшего ядерного топлива. Предложена методология размещения контейнеров для уменьшения влияния ветра на протяжении всего срока хранения отработавшего ядерного топлива. Исследования проведены для контейнеров, эксплуатируемых в сухом хранилище отработавшего ядерного топлива на Запорожской АЭС.

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

Отримано 14.10.2018