

З КАФЕДРИ ПРЕЗИДІЇ НАН УКРАЇНИ

**КРУКОВСЬКИЙ
Павло Григорович** –
доктор технічних наук,
завідувач відділу моделювання
процесів тепломасообміну
в об'єктах енергетики
і теплотехнологіях
Інституту технічної
теплофізики НАН України,
kruk@i.kiev.ua

АНАЛІЗ ТЕРМОГАЗОДИНАМІЧНОГО СТАНУ НОВОГО БЕЗПЕЧНОГО КОНФАЙНМЕНТУ І ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ»

**За матеріалами наукового повідомлення
на засіданні Президії НАН України
15 січня 2014 року**

Розглянуто конструкцію і призначення Нового безпечного конфайнменту, який нині будується на Чорнобильській АЕС біля об'єкта «Укриття». Для забезпечення тривалої експлуатації комплексу обґрунтовано необхідність аналізу та прогнозування сумісних термогазодинамічних і вологісних процесів у конфайнменті. Розроблено тривимірну комп'ютерну модель, яка дала змогу перевірити працездатність системи вентиляції в потенційно можливих кліматичних умовах та у разі відмови вентиляційного устаткування. Наведено результати застосування розробленої моделі для прогнозування поширення радіоактивного пилу в повітряному об'ємі та утворення конденсату на поверхнях конфайнменту і об'єкта «Укриття».

Ключові слова: Чорнобильська АЕС, об'єкт «Укриття», Новий безпечний конфайнмент, термогазодинамічні процеси, радіаційна безпека, моделювання.

Призначення і конструкція Нового безпечного конфайнменту

Новий безпечний конфайнмент (НБК), призначений для захисту об'єкта «Укриття» Чорнобильської АЕС, є унікальним інженерно-технічним комплексом, основними функціями якого є обмеження радіаційного впливу на населення, персонал і навколишнє середовище під час нормальної експлуатації об'єкта «Укриття», його демонтажу та виконання робіт з вилучення ядерного палива і паливовмісних матеріалів [1].

НБК складається зі сталевих конструкцій у вигляді арки, що накривають об'єкт «Укриття» (ОУ), технологічної будів-

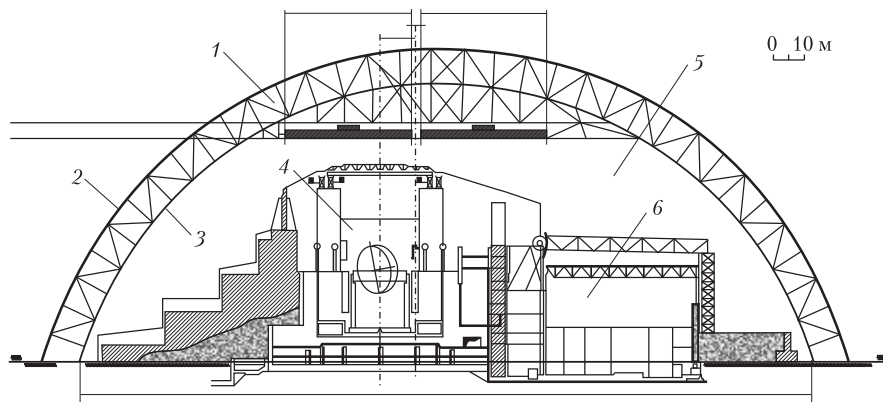
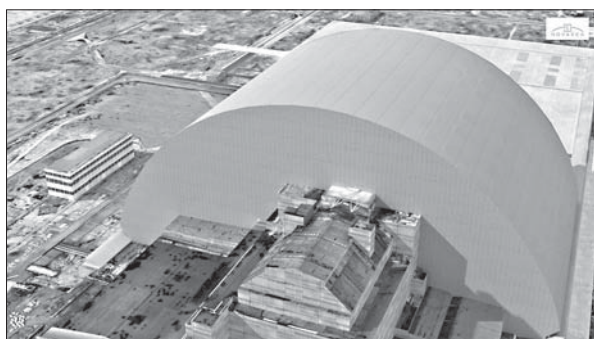


Рис. 1. Схема об'єкта «Укриття» та Нового безпечного конфайнменту в поперечному перерізі: 1 – сталеві несівні конструкції та кільцевий простір Арки; 2 – зовнішня оболонка; 3 – внутрішня оболонка; 4 – об'єкт «Укриття» і зруйнований реактор; 5 – основний об'єм НБК; 6 – машинний зал



a



б

Рис. 2. Загальний вигляд НБК (комп'ютерна графіка) (а) і хід його будівництва станом на кінець 2013 р. (б)

лі, розташованої в західній частині Арки, де буде встановлено більшість систем життєзабезпечення та контролю, і допоміжної будівлі, в якій знаходиться інші системи [2]. Для забезпечення захисту навколишнього середовища і гарантування довгострокового (до 100 років) опору корозії структурну частину Арки

(рис. 1) планується обшити двома металевими оболонками всередині (3) і зовні (2). У кільцевому просторі та основному об'ємі передбачено спеціальну систему вентиляції, яка має забезпечити необхідний режим вологості з метою зниження до мінімуму корозії металевих конструкцій кільцевого простору і запобігти потраплянню в навколишнє середовище аерозольних викидів, що можуть виникнути під час демонтажу конструкцій об'єкта «Укриття».

Арка НБК має такі розміри: висота близько 109 м, довжина – 160 м, ширина – 260 м. Об'єм повітря між внутрішньою і зовнішньою оболонками Арки (1) становить близько 1,0 млн м³, а повітряний об'єм усередині Арки (5) – 1,7 млн м³. Об'єм будівель під Аркою, в тому числі ОУ, – близько 1,0 млн м³. Загальна вага Арки – 33 тис. т.

Проектування і спорудження НБК забезпечує консорціум NOVARKA (до його складу входять дві французькі компанії – VINCI Construction Grands Projets та Bouygues Travaux Publics). Арку монтують на спеціальному будівельному майданчику за 200 м від четвертого енергоблока ЧАЕС, а потім її мають насунути на об'єкт «Укриття». Завершення будівництва заплановано на кінець 2015 р. На рис. 2 показано майбутній вигляд Нового безпечного конфайнменту і частково вже побудовану (станом на кінець 2013 р.) першу (східну) частину Арки.

Однією з найважливіших інженерних систем НБК є система вентиляції, яка насамперед має забезпечити потрібний режим відносної

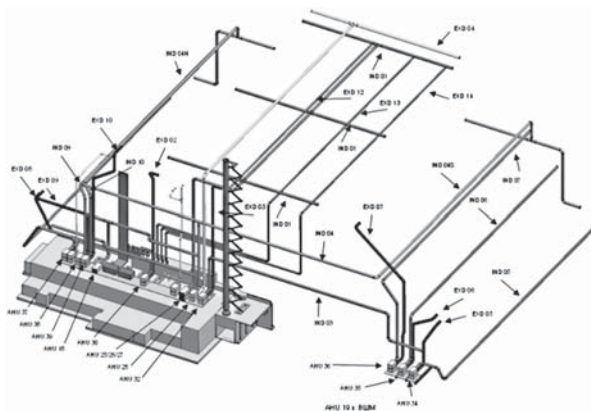


Рис. 3. Схема системи вентиляції НБК

вологості (не більш як 40%) і рівень підвищення тиску повітря (50–75 Па) в кільцевому просторі Арки, а також вентиляцію і наявність слабкого вакууму (≈ -5 Па) в основному об'ємі НБК за різних метеорологічних умов. Необхідність підтримання низького рівня відносної вологості спричинено вимогою зниження до мінімуму корозії металевих конструкцій, розміщених у кільцевому просторі, для забезпечення 100-річного ресурсу НБК.

Система вентиляції (рис. 3) складається з підсистеми вентиляції та осушення кільцевого простору для підтримання зазначеного вище рівня відносної вологості повітря і підсистеми вентиляції основного об'єму НБК для забезпечення надходження свіжого повітря в місця роботи персоналу та відведення повітря з ділянок з найбільшою концентрацією радіоактивних аерозолів, передусім з простору над ОУ.

До підсистеми вентиляції кільцевого простору входять колектор, що нагнітає свіже осушене й підігріте повітря, і 9 контурів рециркуляції та додаткового підігріву повітря.

Модель термогазодинамічного стану НБК

Оскільки вологісний режим повітряних об'ємів Арки безпосередньо залежить від температурного і газодинамічного режимів у цих об'ємах, то для детального аналізу працездатності системи вентиляції НБК виникла по-

треба розробити інструмент, здатний виконати такий аналіз. У ролі такого інструменту консорціум NOVARKA обрав тривимірне CFD (Computational Fluid Dynamic) комп'ютерне моделювання, а Інститут технічної теплофізики НАН України виграв тендер на виконання цього завдання. Опис вибраної моделі та основних результатів її застосування для детального аналізу температурно-вологісного і газодинамічного режимів, працездатності системи вентиляції НБК і можливості утворення конденсату, а також для аналізу поширення радіоактивного пилу наведено нижче.

Фізичну модель теплових і газодинамічних процесів побудовано на таких принципах. Температурно-вологісний режим у кільцевому просторі Арки, основному об'ємі НБК та будівельних конструкціях об'єкта «Укриття» формується внаслідок складної взаємодії аеродинамічних і тепломасообмінних процесів, що відбуваються в НБК (рис. 1). Це, по-перше, процеси теплопровідності через елементи будівельних конструкцій, по-друге, конвективний теплообмін між повітряними потоками і поверхнями Арки та ОУ, по-третє, змішування повітряних потоків з різною температурою і вологістю, що надходять в об'єм кільцевого простору та основний об'єм НБК, а також відводяться з цих об'ємів, і, насамкінець, тепло, яке надходить в основний об'єм з ОУ, від системи освітлення Арки та з деаераторної етажерки.

Основним джерелом теплонадходження в кільцевий простір у літній період є сонячна радіація і конвективне теплопідведення від вітрового потоку, що впливає на зовнішню поверхню Арки. Теплові потоки із зовнішньої поверхні внаслідок теплопровідності через металеві елементи конструкції передаються в міжарковий повітряний простір і основний об'єм НБК. У зимовий період основним механізмом тепловідведення із зовнішньої поверхні Арки в навколишній простір є також радіаційно-конвективне теплоперенесення.

Іншими джерелами теплонадходження в кільцевий простір є потоки осушеного і підігрітого повітря, що нагнітається з навколиш-

нього середовища, а також рециркуляційні підігріті повітряні потоки. Ці повітряні потоки формуються шляхом відбору повітря з кільцевого простору, його підігріву до певної температури і подальшого повернення в об'єм кільцевого простору. Відведення теплоти з кільцевого простору, крім тепловтрат у зимовий період, відбувається також завдяки інфільтраційним перетіканням повітря крізь нещільності в оболонках аркових конструкцій у зовнішнє середовище та основний об'єм НБК. Ці перетікання виникають унаслідок підвищеного тиску в кільцевому просторі (на 50–75 Па) порівняно з навколишнім середовищем, що має унеможливити неорганізоване проникнення в кільцевий простір Арки вологого повітря ззовні, а також проникнення радіоактивних аерозольних викидів з основного об'єму через кільцевий простір у навколишнє середовище.

Температурно-вологісний режим основного об'єму Арки формується завдяки:

- радіаційно-конвективній взаємодії поверхонь внутрішньої оболонки Арки з поверхнями конструкцій кільцевого простору та будівельними конструкціями ОУ;
- проникненню повітря і вологи з навколишнього середовища крізь щілини між вертикальними стінами Арки та будівельними конструкціями ОУ;
- потокам теплоти і маси з кільцевого простору в основний об'єм;
- джерелам внутрішнього тепловиділення в ОУ та освітлювальних приладах;
- системі припливно-витяжної вентиляції повітря в основному об'ємі;
- перенесенню теплоти з і в основний об'єм від поверхні ґрунту і фундаментів, на яких розташований НБК;
- тепловій ємності масивних металевих конструкцій Арки, бетонних конструкцій ОУ, ґрунту і фундаменту, яка впливає на тривалі нестационарні процеси денних, місячних і річних циклів.

Як уже було зазначено, температурно-вологісний режим основного об'єму НБК має бути таким, щоб тиск у ньому був дещо нижчим, ніж

тиск повітря в кільцевому просторі, а також у навколишньому середовищі. За таких умов унеможлиблюється спонтанне перетікання забрудненого повітря з основного об'єму в міжарковий кільцевий простір і зовнішнє середовище.

Результати аналізу термогазодинамічного стану НБК

Для виконання завдання було створено тривимірну комп'ютерну модель термогазодинамічних процесів у НБК і ОУ на основі CFD-технології чисельного моделювання. Модель містить як частини моделі Арки, так і частини всіх об'єктів, розташованих під нею, зокрема ОУ, ґрунти і фундаменти (рис. 4, див. вклейку).

Як було зазначено вище, граничні умови на зовнішній оболонці Арки задавали у вигляді умов радіаційно-конвективного теплообміну і умов масообміну повітря, що слабо фільтрується, та вологості між поверхнями оболонки і зовнішнім середовищем унаслідок перепаду тиску, який визначається напрямком і силою вітру, що обтікає НБК. Між усіма твердими поверхнями НБК, ОУ, поверхнею землі і повітрям, що обтікає ці поверхні, задавали умови спряженого теплообміну. Повітро- і вологообмін між основним об'ємом і навколишнім середовищем здійснювався за допомогою системи вентиляції і протікань повітря та вологи з навколишнього середовища крізь щілини між вертикальними стінами Арки та будівельними конструкціями ОУ. Величина цих протікань також залежить від напрямку і сили вітру. Вплив землі й фундаментів враховували введенням в основну модель області розв'язку і додаткової сітки, що охоплює ґрунт і фундаменти під Аркою на глибину до 15 м (рис. 4б). Температура ґрунту на цій глибині є стабільною, і в моделі її приймали такою, що дорівнює 10 °С. Працездатність і достовірність комп'ютерної моделі було показано шляхом верифікації результатів розрахунків, отриманих експериментально для фрагментів моделі, а також за допомогою низки більш простих моделей — моделей зі згрупованими параметрами приблизно зі 100

розрахунковими вузлами, і ще простіших моделей балансного типу.

Розроблену модель термогазодинамічних і вологісних процесів у повітряних об'ємах НБК, усіх будівельних конструкціях, ОУ та фундаментах і ґрунтах під ними було використано для детального аналізу розподілу температур і вологості в кільцевому й основному об'ємах НБК та ОУ за різних кліматичних умов у стаціонарних і нестаціонарних режимах, а також для прогнозування тепловологісного стану ОУ і НБК у разі відмови різних частин вентиляційного обладнання. На рис. 5 (див. вклейку) наведено приклад такого розподілу температур і вологості в кільцевому та основному об'ємах НБК і ОУ в стаціонарному режимі в літній час за температури навколишнього повітря 32 °С, відносної вологості 100 % і відсутності вітру. Аналіз розподілу температур і вологості в кільцевому просторі Арки дозволив перевірити можливість появи ділянок з вологістю понад 40 %, що є неприпустимим. Такі ділянки були зосереджені в кутових частинах, розташованих біля землі.

Проведені дослідження показали, що система вентиляції загалом є працездатною в діапазоні заданих кліматичних умов зі зміною температури навколишнього повітря від -22 до +32 °С, відносної вологості від 50 до 100 % і сили вітру від 0 до 25 м/с. Тимчасове перевищення рівня вологості в кільцевому просторі спостерігалось лише за сили вітру, яка перевищувала 7,2 м/с.

Важливим результатом виконаної роботи є аналіз працездатності системи вентиляції НБК у разі відмови різних систем вентиляції, зокрема зупинки деяких або всіх контурів рециркуляції, відмови в роботі осушувальної машини, відключення системи підігріву повітря тощо. У цих випадках визначали час появи ділянок повітря в кільцевому просторі з неприпустимою вологістю понад 40 %. Таке оцінювання необхідне для визначення тривалості ремонту або заміни обладнання.

Розроблена модель дала змогу проаналізувати утворення конденсату на поверхнях Арки і особливо на поверхнях ОУ для різних ме-

теорологічних умов і сезонів року. На рис. 6а (див. вклейку) наведено розподіл відносної вологості на поверхнях ОУ навесні. Він ілюструє утворення конденсату в зонах об'єкта «Укриття», розташованих біля поверхні землі та на самій землі. Така інформація є надзвичайно важливою для проектування системи збирання і відведення цього радіоактивного конденсату.

Модель уможливила також детальний облік термогазодинамічних процесів руху повітряних потоків, спричинених роботою системи вентиляції та природною конвекцією повітря внаслідок перепадів температур між окремими частинами НБК і ОУ, що дозволяє аналізувати рух радіоактивного пилу в основному об'ємі НБК і потенційно можливих викидів цього пилу в навколишнє середовище та за межі НБК. На рис. 6б наведено приклад розподілу густини частинок радіоактивного пилу, що виходить зі зруйнованого реактора в основний об'єм НБК внаслідок теплової конвекції від тепловидільних (близько 36 кВт) розплавлених після аварії паливних мас.

Аналіз руху радіоактивного пилу в основному об'ємі НБК і можливих викидів у навколишнє середовище крізь щілини між вертикальними стінами НБК та будівлями ОУ є особливо важливим під час демонтажу конструкцій об'єкта «Укриття» і роботи з радіоактивними відходами.

Зазначені вище можливості розробленої моделі дозволяють розглядати її як складову системи моніторингу НБК та ОУ для аналізу і прогнозування теплового, газодинамічного, вологісного та радіаційного стану НБК і ОУ під час їх тривалої експлуатації як у нормальному режимі, так і в разі відмови устаткування та аварійних ситуацій.

Висновки

Розглянуто призначення і конструкцію Нового безпечного конфайнменту, який будується біля об'єкта «Укриття» Чорнобильської АЕС і який має запобігти потраплянню радіоактивних матеріалів зі зруйнованого реактора

№ 4 у навколишнє середовище під час його демонтажу.

Обґрунтовано необхідність аналізу та прогнозування спільних термогазодинамічних і вологісних процесів у ОУ і НБК, які визначають 100-річний ресурс НБК.

Для виконання аналізу та прогнозування термогазодинамічних і вологісних процесів у ОУ і НБК розроблено тривимірну комп'ютерну CFD-модель, яка дала змогу перевірити працездатність системи вентиляції НБК у різних кліматичних умовах зі зміною температури навколишнього повітря від -22 до $+32$ °С, відносної вологості від 50 до 100 % і сили вітру від 0 до 25 м/с, а також у разі відмови вентиляційного обладнання. Проведені дослідження показали, що система вентиляції загалом є працездатною в діапазоні заданих кліматичних умов.

Проведено аналіз утворення конденсату на поверхнях Арки і особливо на поверхнях об'єкта «Укриття» для різних метеорологічних умов і сезонів року. Аналіз показав, що найбільше утворення конденсату спостерігатиметься на-

весні в зонах ОУ, розташованих біля поверхні землі і на самій землі.

Розроблена модель дає змогу аналізувати рух радіоактивного пилу в основному об'ємі НБК та можливі викиди цього пилу за межі конфайнменту.

Можливості такої моделі дозволяють розглядати її як складову системи моніторингу Нового безпечного конфайнменту і об'єкта «Укриття» ЧАЕС для аналізу і прогнозування їх теплового, газодинамічного, вологісного та радіаційного стану при довготривалій експлуатації конфайнменту як у нормальному режимі роботи, так і в разі аварійних ситуацій та відмови обладнання.

Доповідач висловлює подяку директору Інституту технічної теплофізики НАН України академіку А.А. Долінському, колегам М.О. Метель, А.С. Полубінському, С.Г. Подзігуну, В.Г. Новикову, Е.А. Юрашеву, а також співробітникам компанії NOVARKA Б. Вільямсу, В. Бороздінку і Ф. Мішу за керівництво та участь у виконанні цієї роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Про загальні засади подальшої експлуатації і зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення зруйнованого четвертого енергоблока цієї АЕС на екологічно безпечну систему: Закон України № 309-XIV від 11.12.1998.
2. Концептуальный проект Нового безопасного конфайнмента. Чернобыльская атомная электростанция. Блок 4. Государственное специализированное предприятие «Чернобыльская атомная электростанция» (ГСП ЧАЭС), 2003 г.

П.Г. Круковский

Институт технической теплофизики НАН Украины
ул. Желябова, 2а, Киев, 03680, Украина

АНАЛИЗ ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НОВОГО БЕЗОПАСНОГО КОНФАЙНМЕНТА И ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ»

Рассмотрены конструкция и назначение Нового безопасного конфайнмента, строящегося на Чернобыльской АЭС возле объекта «Укрытие». Для обеспечения долговременной эксплуатации комплекса обоснована необходимость анализа и прогнозирования совместных термогазодинамических и влажностных процессов в конфайнменте. Разработана трехмерная компьютерная модель, которая дала возможность проверки работоспособности специальной системы вентиляции при различных климатических условиях и в случае отказа вентиляционного оборудования. Представлены результаты применения разработанной модели для прогнозирования распространения радиоактивной пыли в воздушном объеме и образования конденсата на поверхностях конфайнмента и объекта «Укрытие».

Ключевые слова: Чернобыльская АЭС, объект «Укрытие», Новый безопасный конфайнмент, термогазодинамические процессы, радиационная безопасность, моделирование.

P.G. Krukovskiy

Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine
2a Zhelyabov St., Kyiv, 03680, Ukraine

THERMOGASODYNAMIC STATE ANALYSIS
FOR NEW SAFE CONFINEMENT AND THE OBJECT “SHELTER”

Considered design and purpose of the New Safe Confinement, which is currently under construction at Chernobyl NPP near the Object “Shelter”. For long-term (100 years) operation of confinement needs analysis and forecasting compatible thermogasodynamic and humid processes in confinement. For this purpose, a three-dimensional computer model was developed, which also gave the opportunity to verify that the project special ventilation system in confinement works correctly in possible climatic conditions and the ventilation equipment refusals. We also consider the results of applying the developed models for predicting the spread of radioactive dust into the air volume and the formation of condensation on surfaces of confinement and Object “Shelter”.

Keywords: Chernobyl NPP, Object “Shelter”, New Safe Confinement, thermogasodynamic processes, radiation safety, modeling.