

УДК 536.242:532.242

CFD - АНАЛІЗ ТЕПЛОВОЛОГІСНОГО СТАНУ НОВОГО БЕЗПЕЧНОГО КОНФАЙНМЕНТУ ЧАЕС (ПРОЄКТНІ ПАРАМЕТРИ)

Круковський П.Г., доктор технічних наук, Смольченко Д.А.

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст., 2а, Київ, 03057, Україна,
ел. пошта: kruk_2@ukr.net

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2022.8>

Представлені результати моделювання теплового та вологісного стану Нового Безпечного Конфайнменту (НБК) в умовах нормальної експлуатації з метою аналізу розподілу вологості в об'ємі кільцевого простору (КП), для проєктних даних температури, напрямку та швидкості вітру, а також вологості навколишнього середовища. Розглянуто стан НБК за умови повного відключення системи осушення та вентиляції НБК. Аналізується також питання можливості підвищення енергоефективності енергоємної системи вентиляції шляхом відключення окремих вентиляційних установок та контурів рециркуляції в КП за умови не перевищення вологості 40%.

The results of modeling the thermal and humidity state of the New Safe Confinement (NSC) under normal operation conditions are presented in order to analyze the distribution of humidity in the volume of the annular space (CS), for the design data of temperature, wind direction and speed, as well as environmental humidity. The state of the NSC is considered under the condition of complete shutdown of the drainage and ventilation system of the NSC. The issue of the possibility of increasing the energy efficiency of an energy-intensive ventilation system by turning off individual ventilation units and recirculation circuits in the CP is also analyzed, provided that the humidity does not exceed 40%.

Бібл. 4, рис. 3, табл. 2.

Ключові слова: Новий Безпечний Конфаймент, тепловологісний стан, система вентиляції, CFD моделювання, енергоефективність.

АЕС – атомна електростанція;
ВУ – вентиляційна установка;
ІТТФ – Інститут технічної теплофізики.
КП – кільцевий простір;
НБК – Новий Безпечний Конфаймент;

ОО – основний об'єм;
ОС – оточуюче середовище;
ОУ – об'єкт укриття;
CFD – Computational Fluid Dynamics технологія моделювання.

Вступ. Новий Безпечний Конфаймент (НБК) над зруйнованим реактором та Об'єктом «Укриття» (ОУ) Чорнобильської АЕС (рис. 1), є додатковою захисною спорудою для видалення матеріалів, які містять ядерне паливо у зруйнованому реакторі та перетворення ОУ на екологічно безпечну систему для персоналу, населення та навколишнього середовища. НБК являє собою сталеву конструкцію у вигляді Арки, що складається із сталевих несучих конструкцій, розташованих у кільцевому просторі Арки, зовнішньої та внутрішньої оболонок, під якими знаходяться основний об'єм, Об'єкт «Укриття» та зруйнований реактор.

Для виконання поставлених довгострокових завдань видалення радіоактивних матеріалів та перетворення ОУ на безпечний об'єкт ресурс НБК має становити не менше 100 років, що можливо за умови забезпечення корозійної стійкості несучих сталевих конструкцій у кільцевому просторі (КП). Арка НБК, виконана з близько 7,5 тис. труб діаметром від 0,4 до 1 м із чорного металу (рис. 1 б, поз. 1). Забезпечити такий ресурс НБК

можливо шляхом підтримки вологості в обсязі КП не більше ніж 40% протягом усього терміну експлуатації. Для підтримки заданої вологості в КП передбачена складна система вентиляції (рис.2), що складається з колектора 1 (у кружечку) нагнітання осушеного повітря з 18-ма вихідними патрубками 1, контурів рециркуляції 2-10 (у кружечках) кільцевого простору та вентиляції основ 11-13 (у кружечках). Цифри в кружечках позначають колектор (1) та номери контурів рециркуляції. Стрілки спрямовані: в контур – патрубки контурів, що всмоктують; спрямовані з контуру – нагнітальні патрубки контурів. ВУ – вентиляційні установки із номерами, що відповідають номерам контурів. Гілки з номерами 11-13 – витяжна вентиляція основного об'єму.

Ця система вентиляції повинна забезпечує підвищений щодо ОО тиск повітря на рівні 10...30 Па. Для підтримки таких рівнів тисків в об'ємах КП і ОО розмірами близько 1 млн. м³ кожен безперервно працюють 3 вентиляційні установки (ВУ1) на нагнітання сухого повітря в КП загальною продуктивністю

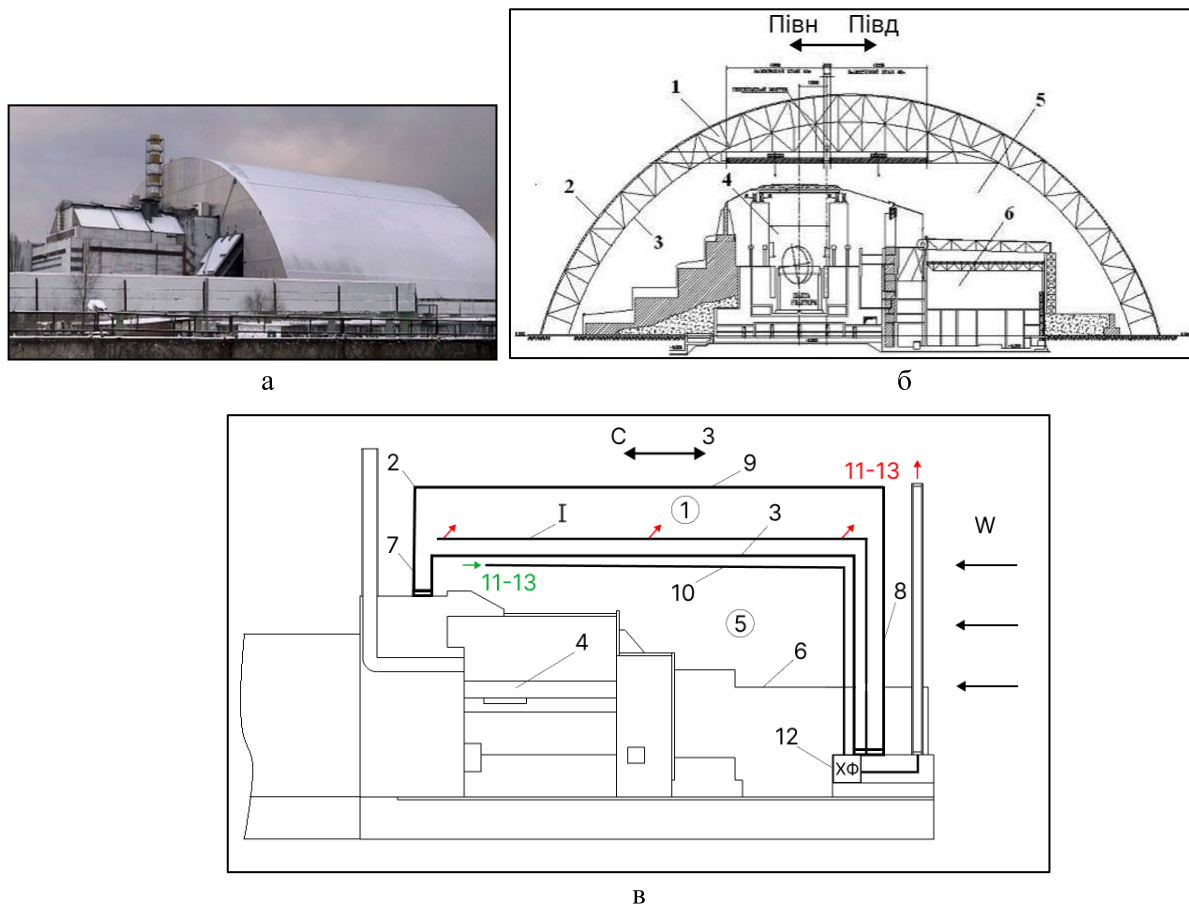


Рис. 1. Рис. а – фото Нового Конфайнмента зі сторони східної стіни та не зруйнованого реакторного блоку №3 [1]; рис. б – схема у поперечному перетині НБК та рис. в – схема повздовжнього перерізу НБК. На рис. б і в: 1 – сталеві конструкції та кільцевий простір Арки НБК, 2 – зовнішня оболонка, 3 – внутрішня оболонка, 4 – Об’єкт «Укриття» та зруйнований реактор, 5 – основний об’єм НБК, 6 – машзал; На рис. в: 1 (у кружечку) – кільцевий простір, 5 (у кружечку) – основний об’єм, I – нагнітаючий трубопровід сухого повітря в КП з 18 патрубками (рис. 3), 7 – частина зовнішньої оболонки на східній стіні, 8 – частина зовнішньої оболонки на західній стіні, 9 – частина зовнішньої оболонки на циліндричній стіні, 10 – три трубопроводи (11-13) витяжна вентиляція з ОО (рис. 2), 12 – НЕРА фільтри витяжної вентиляції

75 тис. м³/год і 3 вентиляційні установки ВУ11 загальною продуктивністю до 140 м³/год для витяжки повітря з ОО за межі НБК через горизонтальні канали 11-13, НЕРА фільтри РА та вертикальну вентиляційну трубу вгору на висоту 111 м (рис. 1, в та рис. 2). Інші ВУ2-ВУ10 продуктивністю до 480 тис. м³/год кожен, задіяні для рециркуляції (перемішування) повітря в КП з метою забезпечення максимально рівномірної за обсягом вологості, локальні значення якої залежать від локальних значень температур в об’ємі КП та від місць проникнення вологості з навколишнього середовища

через не щільність зовнішньої оболонки НБК. Загальна потужність всіх ВУ системи вентиляції становить близько 1 МВт.

У процесі проектування НБК та системи вентиляції виникла необхідність провести аналіз нерівномірності вологості в обсязі КП за різних кліматичних умов та кількості вентустановок, що нагнітають у КП осушене повітря, а також ефективність системи рециркуляції для вирівнювання нерівномірності вологості в обсязі КП. Було ухвалено рішення, що такий аналіз можна провести за допомогою сучасних технологій 3D CFD моделювання тепловологісного стану НБК.

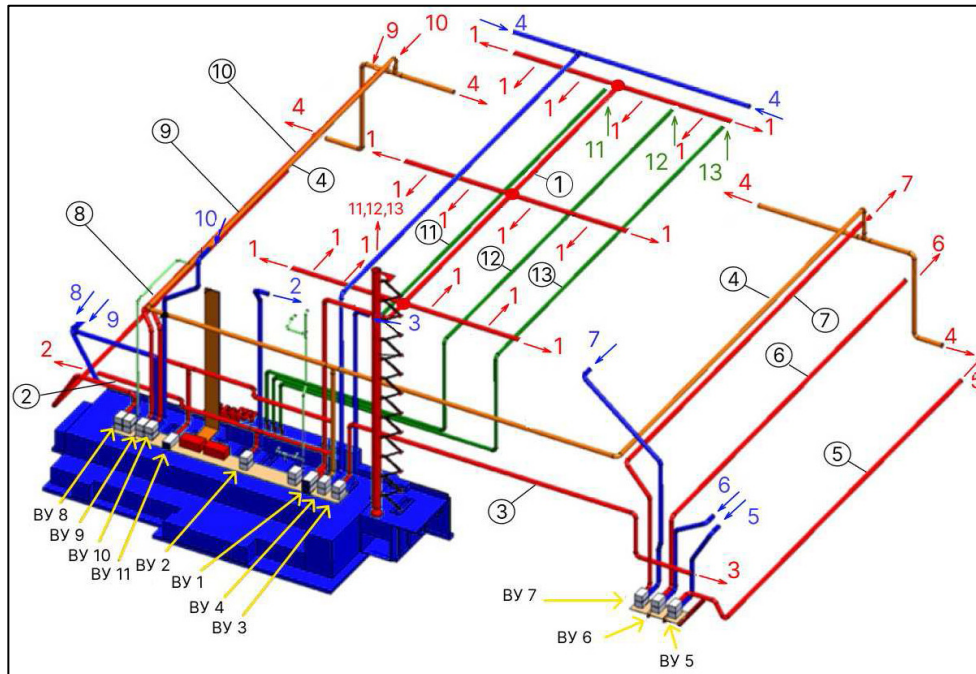


Рис. 2. Схема вентиляції НБК: Цифри 1 позначають місця 18 патрубків нагнітання сухого повітря з 3-х рядного колектора, контуру 2-3 – вентиляція західної стіни, контур 4 – вентиляція східної стіни з 2-ма всмоктуючими і 4-ма нагнітаючими патрубками, 5-7 – південної та 8-10 – північної частини циліндричної частини кільцевого простору

Попередній аналіз був виконаний співробітниками ІТТФ і коротко представлений в [2-4] співавторами цієї статті, але у зв'язку з введенням НБК в експлуатацію виникла необхідність більш детального аналізу розподілу вологості в КП НБК для різних швидкостей вітру, кількості працюючих ВП, оцінки часу підйому концентрації вологості в КП при виході з ладу вентиляційного обладнання, а також можливості зниження споживання енергії вентиляційного обладнання за умови не перевищення 40% вологості в КП. **Ця робота присвячена відповідям на ці важливі питання, що й є метою даної роботи.**

Виконання такого аналізу можливе лише за допомогою технології тривимірних CFD (Computational Fluid Dynamic) моделей, фізична та комп'ютерна складова якої коротко описана нижче.

Фізична модель НБК. Температурно-вологісний стан у кільцевому просторі НБК та в основному обсязі формується в результаті взаємодії аеродинамічних та тепломасообмінних процесів. До них відносяться: теплопровідність через елементи будівельних конструкцій, вимушений зовні та вільно-конвективний та радіаційний теплообмін усередині при обтіканні НБК вітровими потоками різною швидкістю та напрямком. В

ОО є різні джерела тепла, одним з яких є тепловиділення від паливних матеріалів в Об'єкті Укриття (рис. 1,б).

Основним джерелом теплонадходжень в КП є потоки підігрітого приблизно до 33 °С осушеного повітря, рециркуляційні повітряні потоки формуються шляхом відбору повітря з одних частин КП і подальшого повернення в інші частини обсягу КП (рис. 2). Перетікання повітря з об'єму КП в об'єм ОО внаслідок перепаду (10...20 Па) тиску відбувається через нещільність (близько 6 м²) у внутрішній оболонці НБК. Підвищений тиск у КП призводить також до перетікання повітря з об'єму КП в навколишнє середовище (ОС) через нещільності (оцінені близько 1 м²) у зовнішній оболонці НБК. Гідравлічні опори внутрішньої та зовнішньої оболонок НБК визначалися окремо з використанням наведених вище умовних площ протікання та рівняння Бернуллі.

Температурно - вологісний стан основного обсягу НБК підтримується таким, щоб тиск у ньому був дещо нижчим, ніж тиск в ОС. За таких умов виключається мимовільне перетікання забрудненого радіаційним пилом повітря з ОО НБК в ОС.

Комп'ютерні моделі. Для виконання роботи в програмному середовищі ANSYS FLUENT була створе-

на 3D CFD - модель, що включає в себе як всі частини Арки НБК, так і всі об'єкти під Аркою, включаючи Об'єкт «Укриття» з зруйнованим реактором, машзал, деараторну етажерку, технологічну будівлю і ґрунт з фундаментами на глибину 15 м. Розрахункова сітка моделі складається з 1 млн. розрахункових комірок, з яких на кільцевий простір припадало близько 0,4 млн. комірок.

Вихідні дані та результати моделювання. Здавались граничні умови у вигляді розподілів тисків на зовнішніх поверхнях НБК, отриманих із спеціальної моделі зовнішнього обтікання НБК, витрат повітря в 43 патрубках вентиляційної системи, розташованих у різних точках кільцевого та основного об'ємів моделі (рис.1-2), а також теплофізичні та гідравлічні характеристики всіх складових НБК, ОУ та місць повітрообміну НБК з навколишнім середовищем.

Підтримка зниженої вологості менше 40% у КП здійснюється за рахунок нагнітання сухого повітря, що проходить із навколишнього середовища через осушувальні машини. У нашому випадку відносна вологість на виході з установок, що нагнітають, через відповідні 18 патрубків приймалася 10% при температурі 33 °С (позиція 1 на рис. 2), а відносна

вологість навколишнього середовища приймалася 100% при температурі 15 °С і швидкостях західного вітру 3,8, 7,3 та 25 м/с. Це повітря перемішується в обсязі КП, який за допомогою 9-ти рециркуляційних контурів із середньою витратою 19 кг/с кожен (позиції 2-10 рис. 2). Таким чином схема підтримки зниженої вологості полягає у витісненні повітря з КП в ОО та ОС через численні нещільності у внутрішній та зовнішній оболонках, наведених вище.

Коротко описана вище 3D CFD-модель дозволила на основі детального аналізу одержуваних полів температур і відносної вологості в об'ємах КП та ОО (рис. 3) визначити розподіл вологості в КП НБК для різних швидкостей вітру, кількості працюючих ВУ, виконати оцінку часу досягнення вологості в КП 40% при виході з ладу вентиляційного обладнання, а також рівні зниження споживання енергії вентиляційного обладнання, що наведено нижче.

У табл. 1 наведено результати аналізу тепловологісного стану обсягів НБК і рівнів економії енергії залежно від кількості вентустановок, що нагнітають в КП, працюючої рециркуляції і швидкостей зовнішнього західного вітру 3.8, 7.3 і 25 м/с. Видно, що за всіх трьох

Табл. 1. Тепловологісний стан об'ємів НБК та рівнів економії енергії в залежності від кількості вентустановок (ВУ), що нагнітають у КП, працюючої рециркуляції та швидкості зовнішнього вітру

| № Варіанту | К-сть ВУ | Сумарні витрати ВУ, м³/ч | Рециркуляція | Швидкість вітру, м/с | Кільцевий простір (КП) | | Основний об'єм (ОО) | | Економія енергії, % |
|------------|----------|--------------------------|--------------|----------------------|------------------------|--------------|---------------------|--------------|---------------------|
| | | | | | Температура, °С | Вологість, % | Температура, °С | Вологість, % | |
| 1 | 3 | 75000 | є | 3,8 | 26,1 | 15,2 | 23,2 | 32,7 | 0 |
| 2 | 2 | 50000 | є | 3,8 | 23,7 | 19,7 | 21,3 | 39,1 | 6 |
| 3 | 2 | 50000 | є | 7,3 | 23,3 | 23,3 | 20,7 | 44,3 | 6 |
| 4 | 2 | 50000 | є | 25 | 21,7 | 36,0 | 18,5 | 66,7 | 6 |
| 5 | 2 | 50000 | нема | 3,8 | 24,02 | 19,14 | 21,77 | 39,88 | 28 |

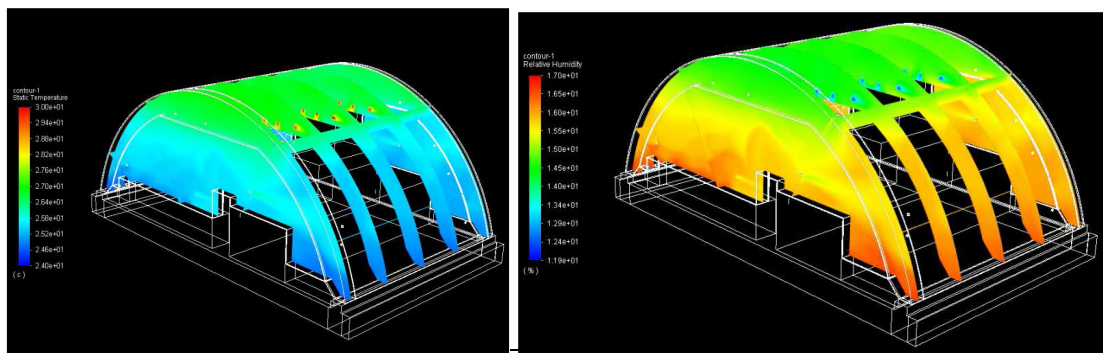


Рис. 3. Типові розподіли полів температур (а) та вологості (б) у поперечних перерізах КП

ВУ, які працюють на нагнітання сухого повітря в КП із сумарною витратою 75000 м³/год, швидкості вітру 3,8 м/с та включеної рециркуляції середня вологість становить 15,2% при температурі 26,1 °С (варіант 1). У цьому основному обсязі температура нижче, а вологість вище, так як туди заходить холодніше (15 °С) і з більшою вологістю (100%) повітря з навколишнього середовища. Для цього варіанта потужність системи вентиляції максимальна (1 МВт), а економія енергії відсутня.

Зниження кількості ВУ до 2-х (вар.2) призводить до підвищення середньої вологості в КП до 19,7%, зниження температури та підвищення вологості в ОО. У цьому з'являється економія енергії лише на рівні 6%. Варіанти 3 та 4 показують суттєвий вплив збільшення вітру з 3,8 до 25 м/с, що призводить до збільшення вологості 36%, близької до максимальної 40%. Варіант 5 показує суттєве збільшення економії енергії до 28% при вимиканні рециркуляції та зменшенні кількості нагнітаючих ВУ.

У табл. 1 наводяться середні по всьому обсягу КП значення вологості, хоча оскільки в повітрі КП мають місце нерівномірності температури, то вони призводять до нерівномірності вологості, що також було досліджено за допомогою моделювання. При повністю працюючій системі вентиляції (вар.1 у таблиці) розподілу температур, вологості та їх максимальні значення видно на рис. 3. Для вар.1 (табл. 1) перепади температур становили 11 °С вологості до 7% при максимальному значенні вологості 17% і мінімальної 10% на виході з патрубків осушення (поз. 1 рис. 2). При відключенні системи рециркуляції повітря перепади температур становили 9 °С, а вологості до 12% при максимальному значенні вологості 22%, що не сильно відрізняється від значень при увімкненій рециркуляції.

Представляє також інтерес аналіз рівнів повітро- та вологообміну КП та навколишнього середовища через внутрішню та зовнішню оболонки НБК, який суттєво залежить від швидкості вітру та впливає на вологість у КП. Такий аналіз можна провести лише за допомогою розглянутої CFD-моделі. У табл. 2 наведено значення витрат повітря та вологи через три частини зовнішньої

та через всю внутрішню оболонки відповідно до параметрів вар.1 у табл. 1. Значення зі знаком «-» означають напрями витрат із КП у довкілля, а позитивні значення означають напрямом витрат у КП. Нижній рядок таблиці показує що витрата повітря і вологи в КП з патрубків системи нагнітання системи вентиляції КП в ОО йде в основному в ОО через внутрішню оболонку. Через частини зовнішньої оболонки повітря та вологи обмінюються набагато менше і знаки потоків залежать від швидкості вітру.

У табл. 1 і 2 розглядалися варіанти з так званими нормальними умовами експлуатації, хоча велике значення є випадком аварійних умов експлуатації, коли відбувається повне відключення системи вентиляції НБК і вологість в КП стає не керованою і починає наближатися до вологості навколишнього середовища. Час досягнення вологості в КП максимального значення 40% залежить від вологості навколишнього середовища та швидкості вітру. Такий сценарій був розрахований для параметрів вар. 3 в табл. 1, а саме відключення системи вентиляції НБК відбулося при швидкості вітру 7,3 м/с та відносній вологості ОС 100%. При такому західному вітру на зовнішній поверхні стіни ставився тиск 23 Па, на східній -36 Па, а на циліндричній поверхні -39,57 Па. Результати такого розрахунку дозволили оцінити час досягнення граничного значення вологості повітря в КП 40%, що становило 4,5 дні для усунення аварії.

Висновки

1. Розглянута складна вентиляційна система нагнітання осушеного повітря та його рециркуляції в кільцевому просторі Нового Безпечного Конфайнменту (НБК) була вперше проаналізована за допомогою розробленої тривимірної CFD-моделі тепловологісного стану складної аروحної конфігурації об'ємів НБК для вибраних проектних параметрів системи та зовнішніх кліматичних умов.

2. CFD-модель дозволила показати, що при розглянутих проектних параметрах роботи вентиляції детальні розподіли та максимальні перепади температур в обсязі НБК не перевищують 9 °С, вологості 7% при нормальній експлуатації системи нагнітання осушеного повітря та

Табл 2. Повітро- та вологообмін через металеві оболонки НБК

| Найменування оболонки | Повітрообмін, кг/с | Вологообмін, г/с |
|---|--------------------|------------------|
| Циліндрична частина зовнішньої оболонки | -3,48 | -11 |
| Східна стіна зовнішня оболонка | -0,86 | -2,71 |
| Західна стіна зовнішня оболонка | 0,28 | 2,96 |
| Внутрішня оболонка | -21,31 | -75,81 |
| Нагнітання у КП | 25,56 | 78,46 |

його рециркуляції. Також показано, що при розглянутих параметрах роботи вентиляції максимальне значення вологості 17% в КП набагато нижче за граничне 40%, що дозволяє знижувати продуктивність системи нагнітання осушеного повітря та його рециркуляції.

3. За умови відключення тільки системи рециркуляції повітря максимальні перепади температур та вологості змінюються слабо (температура до 9 °С та вологості до 12%) при максимальному значенні вологості в КП 22%, що дозволяє підвищити енергоефективність енергоємної (близько 1 МВт) системи вентиляції НБК на 22% за умови не перевищення вологості у КП 40%.

4. Моделювання аварійного відключення всієї системи вентиляції НБК дозволило оцінити час досягнення граничного значення вологості повітря в КП 40%, що становило 4,5 дні для усунення аварії.

5. Подані результати будуть уточнюватися за реальними експлуатаційними та кліматичними даними, які будуть отримані від ЧАЕС.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Концептуальный проект* Нового Безопасного Конфайнмента, Чернобыльская Атомная Электростанция – Блок 4, Государственное Специализированное Предприятие “Чернобыльская Атомная Электростанция (ГСП ЧАЭС)”, Киевская обл., Украина, 2003 г.
2. *Круковский П.Г., Тадля О.Ю., Дейнеко А.И.* Использование CFD-модели тепловлажностного и радиационного состояния в системе мониторинга нового безопасного конфайнмента. Пром. теплотехника. 2017. №1. с 26-31.
3. *Круковский П.Г., Метель М.А., Полубинский А.С.* Анализ и прогнозирование тепломассообменных процессов и радиационного состояния нового безопасного конфайнмента и разрушенного блока ЧАЭС на основе CFD-моделирования. Пром. теплотехника. 2017. №2. с 70-74.
4. *Новый Безопасный Конфайнмент* Чернобыльской АЭС (расчетно-экспериментальный анализ при проектировании и эксплуатации)/ П.Г. Круковский и др. Киев. 2019. 298 с.

CFD - ANALYSIS OF THE HEAT AND MOISTURE STATE OF THE NEW SAFE CONFINEMENT OF CHANEL NPP (design parameters)**Krukovskyi P.G., Smolchenko D.A.**

Institute of Engineering Thermophysics of National academy of sciences of Ukraine, UKRAINE, 03057 Kyiv, Marii Kapnist (Zhelyabov) 2a

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2022.8>

The article discusses the conditions for the long-term (centennial) operation of the New Safe Confinement (NSC), the conditions for maintaining operability in the annular space, which contains all the metal supporting structures of the NSC. These structures are pipes of different diameters from 0.4 to 1 m, the number of which is 7.5 thousand. To ensure the absence of corrosion on these pipes during a 100-year service life in this space, the volume of which is 1,000,000 m³, it is necessary to maintain relative humidity at a level of no more than 40%. The ventilation system, three-dimensional model and results of modeling of the heat-moisture state of the NSC ring space in the conditions of design and emergency modes of operation are considered.

To analyze and predict the heat and humidity regime in the annular space, a mathematical and computer model of the NSC has been developed, including both the annular space and the main volume. The model allows simulating the volumetric distribution of temperature and humidity at different parameters of air dehumidification and different climatic conditions outside. The developed model demonstrates the operability of the model both for the conditions of analyzing the distribution of concentrations and for predicting the heat and humidity state in the annular space in the event of a failure of the ventilation system, and also allows you to analyze the optimal control of the ventilation system to improve the energy efficiency of the system.

References 4, figures 3, table 2.

Keywords: New Safe Containment, heat-humidity condition, ventilation system, CFD modeling, energy efficiency.

1. *Conceptual design of the New Safe Confinement, Chernobyl Nuclear Power Plant - Block 4, State Specialized Enterprise "Chernobyl Nuclear Power Plant (SSE ChNPP)", Kyiv region, Ukraine, 2003. (UKR)*
2. *Krukovsky P.G., Tadlya O.Yu., Deineko A.I. [Using the CFD-model of the heat-humidity and radiation state in the New Safe Confinement monitoring system]. [Industrial heat engineering]. 2017. No. 1. p. 26-31. (UKR)*
3. *Krukovsky P.G., Metel M.A., Polubinsky A.S. [Analysis and forecasting of heat and mass transfer processes and the radiation state of the new safe confinement and the destroyed block of the Chernobyl nuclear power plant based on CFD modeling]. [Industrial heat engineering]. 2017. No. 2. p. 70-74. (UKR)*
4. *New Safe Confinement of the Chernobyl NPP (computational and experimental analysis during design and operation) / P.G. Krukovsky and others. Kyiv. 2019. 298 p. (UKR)*

Отримано 29.07.2022

Received 29.07.2022