

АНАЛІЗ УМОВ ЗБЕРІГАННЯ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА НА МАЙДАНЧИКУ СУХОГО СХОВИЩА

С. В. Альохіна¹, В. М. Голощанов¹, А. О. Костіков¹,
С. П. Клімов², Г. Є. Лучна², В. А. Мороз²

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

²ОП «Запорізька АЕС»

Проведено аналіз температурних вимірів повітря, що охолоджує контейнери зберігання відпрацьованого ядерного палива на майданчику сухого сховища Запорізької АЕС. Визначено фактори, що впливають на тепловий стан контейнерів зберігання, та проаналізовано їхній вплив на результати температурних вимірів. Наведено рекомендації щодо вдосконалення системи температурного контролю контейнерів зберігання відпрацьованого ядерного палива.

Ключові слова: відпрацьоване ядерне паливо, вентилязовані контейнери зберігання, сухе сховище відпрацьованого ядерного палива, температурний контроль.

Вступ

На сьогоднішній день в Україні існує єдине сухе сховище відпрацьованого ядерного палива – на Запорізькій АЕС (ЗАЕС). Воно за своїми проектними критеріями дозволить зберігати більш ніж 9000 відпрацьованих тепловиділяючих збірок, що відповідає кількості збірок, які будуть вивантажені з діючих реакторів ЗАЕС за весь час її експлуатації. Сухе сховище відпрацьованого ядерного палива (ССВЯП) ЗАЕС функціонує з 2001 р. і на сьогоднішній день на його майданчику встановлено 80 вентилязованих контейнерів зберігання (ВКЗ-ВВЕР) відпрацьованого ядерного палива (ВЯП).

Підтримка безпечної експлуатації вже існуючого сховища та створення подібних сховищ на території інших АЕС потребує детального аналізу умов зберігання ВЯП. Для цього необхідно провести дослідження, що дасть змогу визначити ступінь та характер впливу різних факторів (наприклад, погодних умов, додаткових захисних споруд та сусідніх контейнерів тощо) на тепловий стан відпрацьованих тепловиділяючих збірок (ВТВЗ) у контейнерах зберігання.

Обчислення температурних полів та визначення умов, в яких буде мати місце лише безпечний рівень температур для ВТВЗ, наведено у багатьох роботах, наприклад [1 - 3]. Однак багато досліджень проводилися лише за допомогою моделювання, без урахування даних експерименту, або виконувались для сховищ та контейнерів, які не використовуються на території України.

Метою цієї роботи є аналіз погодних факторів, що мають місце на території розташування майданчика ЗАЕС, аналіз результатів вимірів температур повітря з вентиляційних отворів контейнерів зберігання та визначення факторів, що найбільш суттєво впливають на формування температурного стану ВКЗ-ВВЕР та повітря при використанні пасивної системи вентиляції.

Постановка задачі

Майданчик сховища відпрацьованого ядерного палива розташований у північно-східній частині ЗАЕС [4]. Для зберігання ВТВЗ використовуються вентилязовані контейнери, кожний з яких містить у собі герметичну корзину зберігання [4, 5].

В якості теплових критеріїв безпеки обладнання ССВЯП було прийнято наступні величини:

1) допустима температура оболонки твелів для ВТВЗ реактора ВВЕР-1000 при нормальному режимі довгострокового сухого зберігання в гелієвому середовищі становить 350 °С;

2) для короткострокових режимів впливу екстремальних погодних умов та транспортно-технологічних операцій встановлено значення допустимої температури на рівні 450 °С;

3) допустиме тепловиділення палива, що підлягає зберіганню у вентильованому контейнері, не повинно перевищувати 0,99 кВт для однієї ВТВЗ;

4) в умовах нормальної експлуатації та при аномальних значеннях температур навколишнього повітря (40 °С) середня температура бетонного корпусу контейнера не повинна перевищувати 66 °С, максимальна – 107 °С, а в умовах проектних аварій ці величини становлять 93 та 177 °С відповідно.

Для контролю за тепловим режимом зберігання ВЯП у СВВЯП ведеться тепловий контроль ВКЗ-ВВЕР. Реєстрація вимірювань температури проводиться в точках температурного контролю (рис. 1) на виходах із вентиляційних каналів контейнера зберігання.

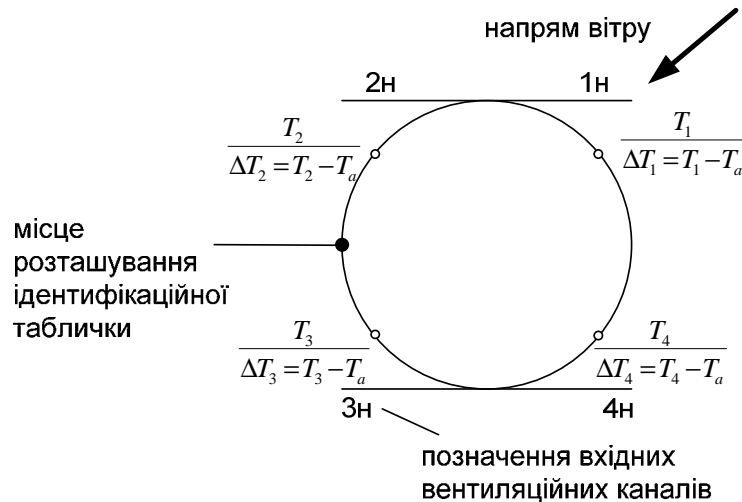


Рис. 1. Розташування точок температурного контролю у вентиляційному тракті ВКЗ-ВВЕР:
 t_i – температура повітря в i -й точці; ΔT_i – перевищення температури повітря в i -й точці над температурою атмосферного повітря T_a ; 1н–4н – порядковий номер входу у вентиляційний канал у нижній частині контейнера.

Температурний контроль проводиться за допомогою термометрів опору, що встановлюються на осі вихідних вентиляційних каналів на глибину 150 - 200 мм від захисної сітки. Вимірювання температури для щойно встановленого ВКЗ-ВВЕР проводяться у перший тиждень зберігання щоденно, упродовж наступних трьох місяців – щотижня й далі – щомісяця. Кожне вимірювання температури здійснюється приблизно о 8 ранку, у цей же час також фіксуються температура атмосферного повітря, швидкість та напрямок вітру [6].

Відповідно до звіту з аналізу безпеки [4] при дотриманні обмеження на температуру оболонок твелів у 350 °С, температура повітря на виході з вентиляційних каналів не повинна перевищувати температуру атмосферного повітря більш ніж на 61 °С. Мета вимірювання температури вентиляційного повітря – контроль нагріву ВТВЗ та, як наслідок, максимальної температури оболонок твелів, а також виявлення в процесі експлуатації значної закупорки вентиляційного тракту ВКЗ-ВВЕР.

Для отримання більш повної інформації про температурний стан ВТВЗ, що зберігаються у ВКЗ-ВВЕР, та для підтвердження безпеки зберігання ВЯП у СВВЯП при зміні зовнішніх впливів доцільно провести додаткові дослідження. Крім того, у випадку модернізації СВВЯП (наприклад, розміщення в контейнерах зберігання збірок нової конструкції з підвищеним остаточним тепловиділенням) необхідні також додаткові дослідження, що спрямовані на підтвердження теплової безпеки такої модернізації.

СВВЯП у ході експлуатації може піддаватись різним зовнішнім впливам, серед яких можна виділити такі: погодно-кліматичні; геологічні; антропогенні.

Оскільки зберігання ВЯП здійснюється на відкритому майданчику, на тепловий стан контейнерів зберігання, перш за все, впливають погодно-кліматичні умови, які у свою чергу залежать від регіону розташування зони зберігання. Іншими зовнішніми впливами можна знехтувати, оскільки ймовірність їхнього виникнення досить незначна.

Район ССВЯП ЗАЕС розташований у Чорноморській атлантико-континентальній степовій області. Континентальне повітря з помірною температурою є основною повітряною масою для даної території як у теплий, так і в холодний період. Район знаходиться під впливом повітряних мас, що приходять з Атлантики, Арктичного басейну або сформувалися над континентальною Євразією.

Середньорічна температура повітря становить 9,2 °С, абсолютний максимум досягає плюс 39 - 40 °С, абсолютний мінімум – мінус 33 - 34 °С. Характерними особливостями погоди є посушливість другої половини літа та зимові відлиги. Потепління, частіше всього, пов'язані з південними циклонами. Навесні більшого значення набирають циклони атлантичного походження. Панують вітри західних та східних напрямків. У цілому ж за рік переважають вітри північно-східного та східного напрямків. Улітку найбільшу повторюваність мають вітри північної чверті рози вітрів. Кількість днів із сильним вітром у середньому за рік становить 17. Частіше сильні вітри мають місце в січні – червні та листопаді. Найбільша кількість днів з сильним вітром за рік досягала 42, за місяць 8 - 10.

Можна виділити наступні особливості формування рози вітрів протягом року в районі розташування ССВЯП:

узимку переважає південно-західний вітер, швидкість якого досягає 9 м/с (швидкість північно-північно-східного вітру 7 – 7,5 м/с);

навесні інтенсивність вітрових потоків посилюється, швидкість північно-східного вітру досягає 10 м/с;

улітку найбільшої величини досягає швидкість північного вітру - 11 м/с;

восени найбільшої величини досягає швидкість північно-східного вітру – 11 - 11,5 м/с;

річна роза вітрів показує, що на місці розташування майданчика ССВЯП переважають вітри північного, північно-північно-східного та північно-східного напрямків із середньою швидкістю 8,0 – 8,7 м/с та південно-південно-західного напрямків зі швидкістю до 8 м/с. Мінімальна середня швидкість при західному напрямку вітру не перевищує 3,5 – 4,0 м/с.

Окремо необхідно відзначити ймовірність штормових та ураганних вітрів, а також смерчів. У таких випадках швидкість вітру може досягати 20 - 30 м/с. Указані явища можуть спостерігатися по всій Україні й регіон ЗАЕС не є виключенням. Вітри на півдні та південному сході України відрізняються особливою тривалістю. У таких випадках, коли сильні вітри тривають по декілька діб, їхня швидкість змінюється в широких межах. Не виключена ймовірність виникнення смерчів і в районі розташування ЗАЕС, однак вона становить менше 0,01 %.

Підходи до розв'язання задачі

Метеорологічні дані для території, де розташовано ССВЯП, дають змогу виявити фактори, що можуть впливати на тепловий стан контейнерів з ВЯП, але не дозволяють оцінити ступінь такого впливу. Оскільки відомо, що з першого дня функціонування ССВЯП ЗАЕС ведеться температурний контроль повітря на виході з верхніх вентиляційних каналів контейнера зберігання, доцільно використати ці дані для оцінки ступеня впливу погодних факторів, зокрема вітру, на тепловий стан контейнерів.

Вітер є найбільш впливовим чинником при формуванні температурних полів контейнерів та ВЯП, що зберігається в них, вентиляційного повітря всередині контейнера та атмосферного повітря на території майданчика сховища. Проаналізуємо послідовно результати вимірів температур на виході з вентиляційного тракту контейнерів у штильових умовах та при натіканні вітру на них за період з серпня 2001 р. по грудень 2009 р.

Для визначення структури течії атмосферного повітря поблизу ВКЗ-ВВЕР можна використати один із програмних комплексів (PHOENICS, FLUENT, FlowVision, CFX тощо), що дає змогу вирішувати задачі гідрогазодинаміки та тепломасообміну.

Результати

За час експлуатації ССВЯП ЗАЕС у дні вимірювання температури було зафіксовано 33 доби з відсутністю вітру (штильові погодні умови).

Очевидно, що за умови відсутності вітру та будь-яких зовнішніх впливів від сусідніх контейнерів і радіаційно-захисних споруд сховища максимальні та мінімальні температури будуть спостерігатися в одних і тих же каналах незалежно від температури зовнішнього повітря. Для прикладу розглянемо контейнер № 1, який встановлено на майданчику 24 січня 2001 р. Виміри температур у штильових умовах наведено на рис. 2, позначення вказано згідно зі схемою, наведеною на рис. 1.

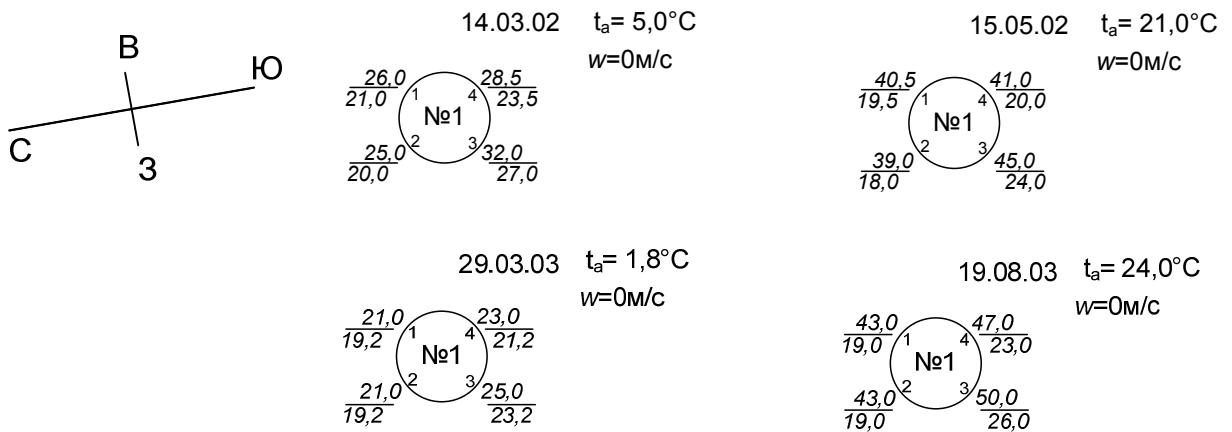


Рис. 2. Значення температур повітря на виході з вентиляційних каналів у штильових умовах.

Виходячи з вимірів температури від 14.03.02, максимальна температура вентиляційного повітря у вихідних каналах контейнера № 1 спостерігається в каналі 3, мінімальна в каналі 2, при цьому різниця між цими значеннями близько 7 °С. Аналогічна картина спостерігається й при вимірах 15.05.02 та 29.03.03 з незначними відхиленнями, що можуть лежати у межах похибки вимірювальної техніки. Нерівномірність значень температур у вихідних каналах, скоріш за все, викликана різними значеннями остаточного тепловиділення ВТВЗ, якими заповнений контейнер зберігання. Тобто можлива така ситуація, коли ВТВЗ з більшим значенням остаточного тепловиділення сконцентровані біля одного краю корзини зберігання, який охолоджується вентиляційним повітрям, що виходить з одного з вентиляційних каналів, обумовлюючи більш високі температури в ньому.

Слід також зауважити, що після витримки ВКЗ-ВВЕР на майданчику сховища близько року (див. рис. 2, виміри від 14.03.02 та 29.03.03) та при незначній різниці температури навколишнього повітря під час вимірювання загальна картина розподілу максимальних та мінімальних температур на виході з каналів збереглась, проте їх рівень дещо зменшився, що обумовлено зменшенням тепловиділення ВТВЗ з часом.

Значення температур повітря на виході з вентиляційних каналів окремо розташованого контейнера в штильових умовах інколи не відповідають загальній картині розподілу максимальних та мінімальних температур, що спостерігається протягом часу зберігання контейнера. Так, наприклад, для контейнера № 1 05.12.02 було зафіксовано температури, які наведено на рис. 3.

Така зміна сталася, скоріш за все, через локальний короткостроковий вплив вітру, який не було зафіксовано метеорологічною станцією. З даних рис. 3, а можна припустити,

що під час замірів температури у вентиляційних каналах вітер був направлений у вихідний канал 1, як показано на рис. 3, б. Це призвело до змішування холодного атмосферного та теплого вентиляційного повітря, що суттєво відбилося на вимірах у каналі 1 (температура нагріву зменшилася приблизно на 16 °С) та дещо вплинуло на температуру нагріву в інших каналах (температура нагріву зменшилася приблизно на 4 °С).

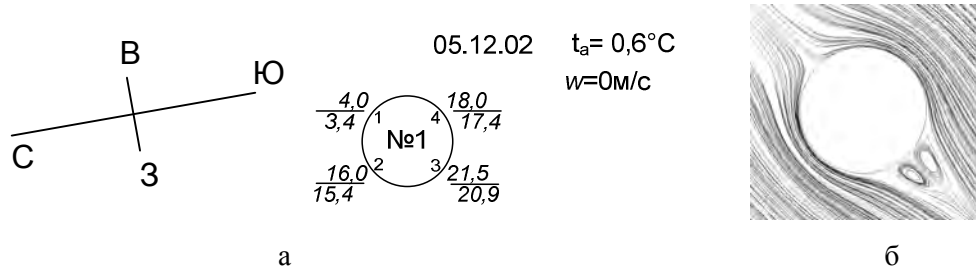


Рис. 3. Окремо розташований ВКЗ-ВВЕР на майданчику сховища:
а - значення температур на виході з каналів; б - структура руху повітря навколо контейнера при вітровому впливі.

Різна ступінь впливу вітру на температуру в каналах обумовлена структурою його руху навколо ВКЗ-ВВЕР (див. рис. 3, б). Значна частина вітрового потоку, що натікає на контейнер, потрапляє до каналу 1. Канали 2 та 4 контейнера знаходяться під впливом потоку, що рухається майже паралельно до площини вихідного перерізу каналів, отже вплив його набагато менший, ніж на канал 1. На температуру повітря у вихідному каналі 3 впливає не основний вітровий потік, а вихор, що утворюється ним після обгинання контейнера, отже вплив його теж незначний, що й видно з результатів вимірів.

На підтвердження висновку про вплив вітру на результати вимірів температури та формування температурних полів контейнера й повітря проаналізуємо температуру повітря, яке виходить з каналів у дні вимірювань, коли напрямок вітру відносно верхніх вентиляційних каналів був аналогічний наведеному на рис. 3, б. Значення вимірів температури при натіканні вітрового потоку на окремо розташований контейнер наведено на рис. 4.

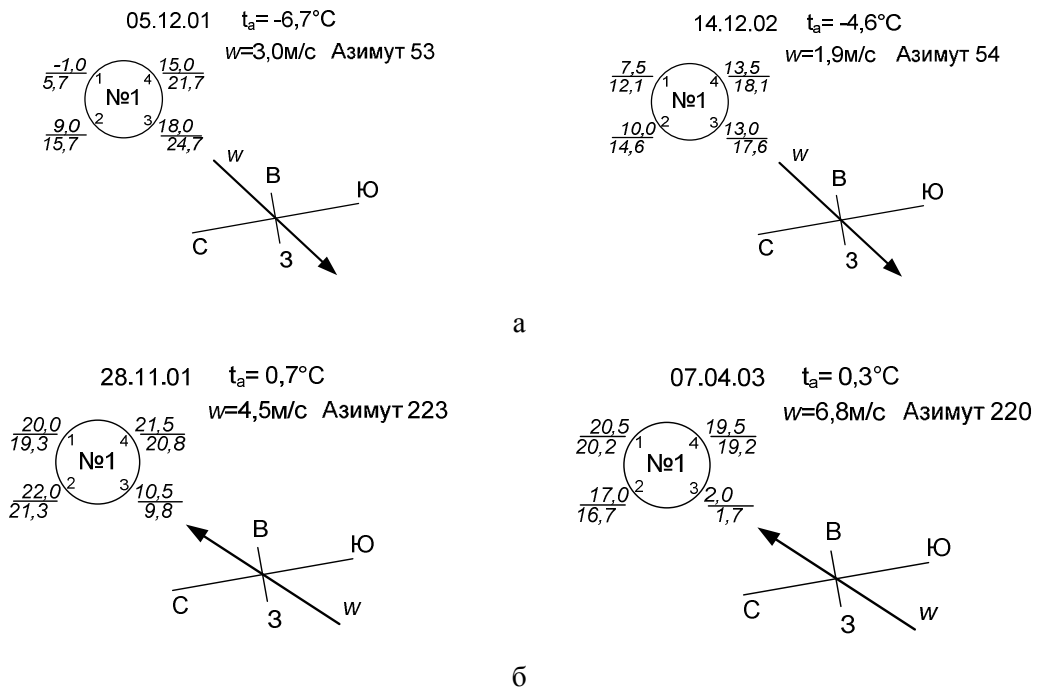


Рис. 4. Значення вимірів температури повітря, що виходить із каналів ВКЗ-ВВЕР при натіканні вітрового потоку на окремо розташований контейнер:
а - натікання на канал 1; б - натікання на канал 3.

При натіканні вітру на вихідний канал 1 (див. рис. 4, а) у ньому спостерігається значне зниження температури нагріву вентиляційного повітря та незначні зниження в інших каналах. Те саме можна сказати й при аналізі значень температур повітря (див. рис. 4, б), коли вітер натікає на канал 3. Отже, це підтверджує припущення, що саме вплив вітру призводить до перерозподілу температур на виході з вентиляційних каналів.

Окремо слід виділити вплив швидкості вітру на температуру нагрітого вентиляційного повітря. Зі збільшенням швидкості вітру температура нагріву зменшується, оскільки більша частина холодного атмосферного повітря потрапляє у вентиляційний канал, перешкоджаючи виходу з контейнера нагрітого вентиляційного повітря та змішується з ним. Цей факт підтверджено на рис. 4, а та б. У першому випадку при зміні температури навколишнього середовища лише на 2,1 °С та зміні швидкості вітру на 1,1 м/с температура нагріву в вентиляційному каналі 1 змінюється більше, ніж у 2 рази. Зменшення температури нагріву вентиляційного повітря при збільшенні швидкості вітру підтверджують дані на рис. 4, б. Підвищення швидкості вітру на 2,3 м/с зменшує температуру повітря, що виходить з каналу 3, більше, ніж у 5 разів. В обох випадках впливом терміну зберігання (тобто зменшенням інтенсивності тепловиділення ВТВЗ з часом) можна знехтувати, оскільки він «зменшує» температуру повітря на виході з каналів на 1-2 °С.

Аналіз температурних вимірів та структури руху вітрового потоку для окремо розташованого ВКЗ-ВВЕР дає змогу виявити лише загальні принципи формування температурних полів контейнера та повітря на виході з вентиляційних каналів при сухому зберіганні ВЯП на майданчику ССВЯП. Оскільки розташування одного ВКЗ-ВВЕР на великій відстані від інших або від радіаційно-захисних споруд не є типовим для майданчика ССВЯП, доцільно розглянути температурні виміри, що здійснювались у контейнерах, які розташовані в групі (рис. 5).

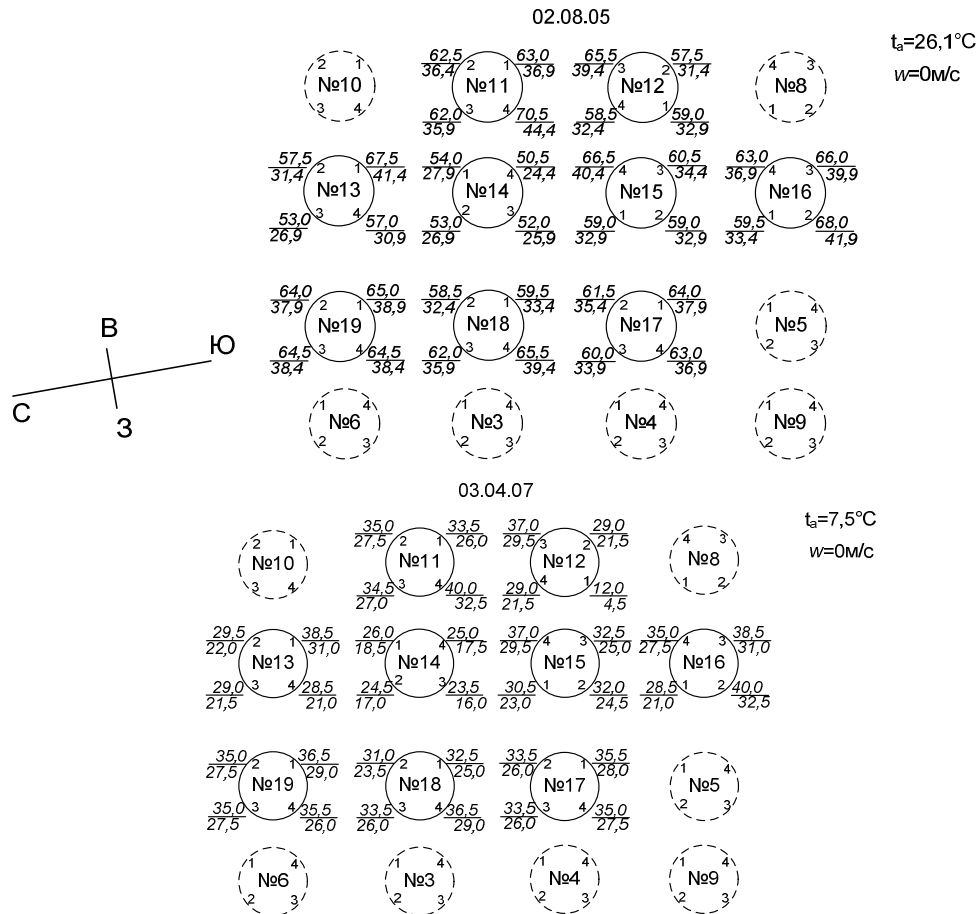


Рис. 5. Значення вимірів температури повітря на виході з вентиляційних каналів у групі контейнерів у штильових умовах.

Як видно з рис. 5, у штильових умовах зберігається загальна картина розподілу максимальних та мінімальних температур на виході з каналів контейнерів, що свідчить про відсутність їх взаємного впливу. Різний ступінь нагріву вентиляційного повітря при вимірюваннях у квітні та серпні обумовлений, скоріш за все, різним значенням температури навколишнього повітря та зменшенням інтенсивності тепловиділення ВТВЗ з часом.

При розташуванні контейнерів у групі також можливі виникнення локальних короткострокових поривів вітру, що можуть змінити значення температур вентиляційного повітря на виході з каналів. Так, при вимірах 03.04.07 (див. рис. 5) такому впливу підданий контейнер № 12, у якому зменшилась температура нагріву вентиляційного повітря у каналі 1 до 4,5 °С.

Ураховуючи вплив вітру на окремо розташований контейнер, доцільно також проаналізувати температурні виміри вентиляційного повітря для групи контейнерів при наявності вітру (рис. 6).

Вітровий потік, що має швидкість 3 м/с, натікає на канал 3 контейнера № 9. Для цього контейнера характер та причини зміни температурних вимірів такі ж самі, як і для окремо розташованого контейнера. Інший вплив зазнають контейнери, що розташовані всередині групи. Як видно з рис. 6, б вітер може зносити тепле повітря, що виходить з каналів одного контейнера та змішувати його з повітрям, що виходить з каналів сусіднього контейнера. Таким чином, значення вимірів температури вентиляційного повітря можуть зазнавати суттєвих змін залежно від напрямку вітру, його швидкості та температури контейнерів, що розташовані поблизу.

Отже, як показують результати аналізу, для чіткої уяви про формування теплових полів повітря та температурного стану контейнерів зберігання ВЯП на майданчику сховища в часі необхідно провести дослідження з урахуванням зовнішнього вітрового впливу.

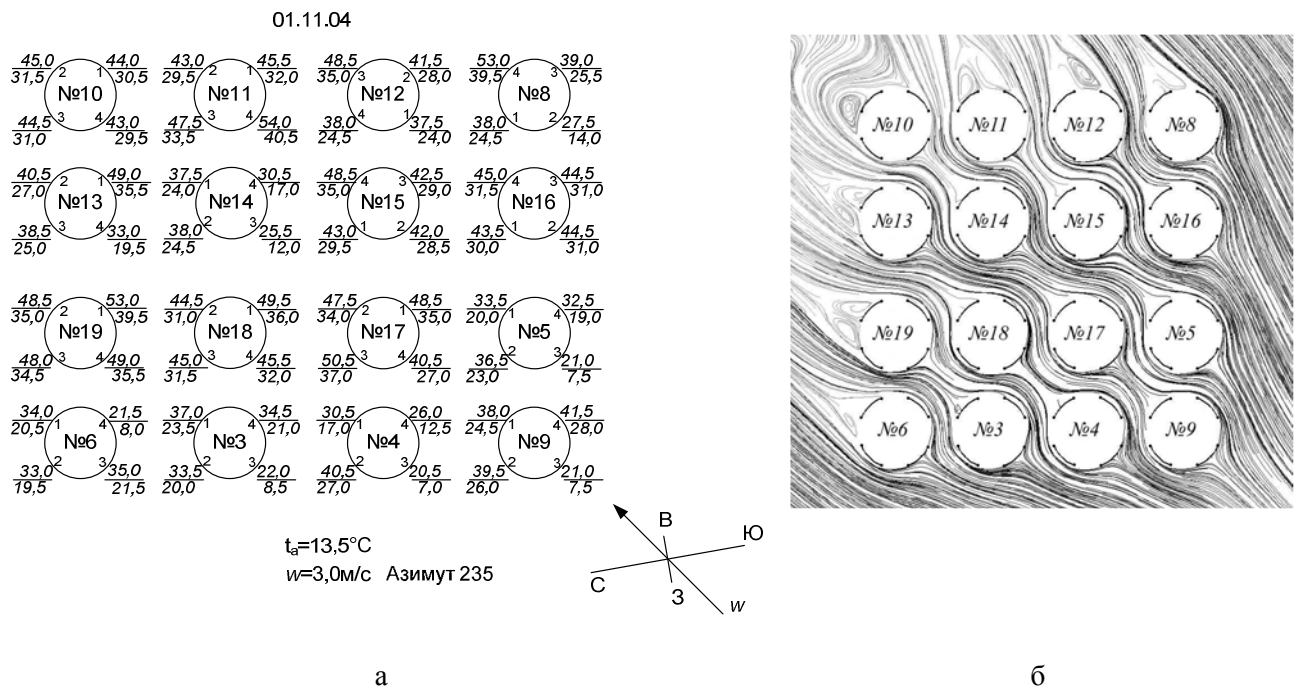


Рис. 6. Група контейнерів на майданчику сховища:

а - значення температур повітря на виході з вентиляційних каналів;

б - структура руху повітря навколо контейнерів при натіканні на них вітрового потоку.

Висновки

Аналіз результатів вимірювання температури на ССВЯП підтвердив суттєвий вплив вітру на формування температурних полів вентиляційного повітря ВКЗ-ВВЕР. При певних погодних умовах система вимірювань температури вихідного повітря з окремих вентиляцій-

них каналів дає значні розбіжності. Тому доцільно вираховувати середньоарифметичне значення результатів вимірювань [6] з урахуванням відповідних поправок при їхній інтерпретації. Разом із цим необхідно проводити детальні дослідження теплових процесів на майданчику сховища, що використовують розрахунково-експериментальний підхід, та визначати форму руху вентиляційного повітря всередині контейнера з урахуванням його геометричних особливостей.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Алехина С. В.* Тепловое состояние вентилируемого контейнера хранения отработавшего ядерного топлива в условиях натекания внешнего воздушного потока / С. В. Алехина, В. Н. Голощапов, А. О. Костиков, Ю. М. Мацевитый // Ядерная физика та енергетика. – 2009. - Т. 10, № 2. – С. 171 - 177.
2. *Walavalkar A. Y.* 3-D CFD Simulation of a ventilated concrete cask used for spent nuclear fuel storage / A. Y. Walavalkar, D. G. Schowalter // WM'04 Conference, February 29 – March 4, 2004, Tucson.
3. *Stratmann W.* Calculation of heat removal from interim storage facilities for the dry storage of spent fuel in dual-purpose casks / W. Stratmann, P. Hages // International symposium on the packaging and transportation of radioactive materials. – Miami, Florida USA, 2004. – P. 45 – 46.
4. *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.
5. *Бейнер К. С.* Анализ безопасности ВКХ-ВВЭР 1000 // Symposium within XV international youth nuclear festival “DYSNAI” – Visaginas, 2002. – С. 22 – 34.
6. *Отработавшее ядерное топливо, хранящееся в СХОЯТ. Руководство по обеспечению регламентного температурного контроля – 00.ОБ. УУ.РЭ.07, ОП «Запорожская АЭС», 2009.* – 22 с.

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА НА ПЛОЩАДКЕ СУХОГО ХРАНИЛИЩА

**С. В. Алехина, В. Н. Голощапов, А. О. Костиков,
С. П. Климов, А. Е. Лучная, В. А. Мороз**

Проведен анализ температурных измерений воздуха, который охлаждает контейнеры хранения отработавшего ядерного топлива на площадке сухого хранилища Запорожской АЭС. Определены факторы, которые влияют на тепловое состояние контейнеров хранения, и проанализировано их влияние на результаты температурных измерений. Даны рекомендации по усовершенствованию системы температурного контроля контейнеров хранения отработавшего ядерного топлива.

Ключевые слова: отработавшее ядерное топливо, вентилируемые контейнеры хранения, сухое хранилище отработавшего ядерного топлива, температурный контроль.

ANALYSIS OF STORAGE CONDITIONS OF THE SPENT NUCLEAR FUEL ON THE DRY STORAGE PLATFORM

**S. V. Alyokhina, V. M. Goloschapov, A. O. Kostikov,
S. P. Klimov, A. E. Luchna, V. A. Moroz**

The analysis of temperature measurements of air which cools storage containers of the spent nuclear fuel on the dry storage platform of the Zaporizhka NPP is carried out. Factors which influence a thermal condition of storage containers are defined, and their influence on results of temperature measurements is analyzed. Recommendations about improvement of system of the temperature control of storage containers of spent nuclear fuel are given.

Keywords: spent nuclear fuel, ventilated container of storage, dry storage of spent nuclear fuel, temperature control.

Надійшла до редакції 08.02.10