

М. А. Метель, П. Г. Круковский, Д. И. Скляренко, А. С. Полубинский

Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова 2а, Киев, 03057, Украина

## CFD-АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НОВОГО БЕЗОПАСНОГО КОНФАЙНМЕНТА

Представлены результаты анализа и прогнозирования распространения радиоактивных аэрозолей (РА) в новом безопасном конфайнменте (НБК) в различных условиях. Рассматриваются условия ввода в эксплуатацию НБК, его эксплуатации, демонтажа конструкций объекта «Укрытие» (ОУ) и извлечения радиоактивных отходов из центрального зала ОУ. Такой анализ и прогнозирование выполнялись с использованием компьютерной модели вычислительной гидродинамики ОУ и НБК. Модель учитывает оседание, накопление и вторичный подъем РА с поверхностей под НБК, что позволяет получать распределения поверхностного загрязнения и определять места наибольшего загрязнения.

*Ключевые слова:* радиоактивные аэрозоли, новый безопасный конфайнмент, поверхностное загрязнение, объемная концентрация, 3D компьютерное моделирование.

### Введение

В данной работе приведены результаты компьютерного моделирования распространения радиоактивных аэрозолей (РА) для условий, соответствующих различным стадиям ввода НБК в эксплуатацию и при различных величинах выбросов РА.

Новый безопасный конфайнмент (НБК) был установлен в проектное положение над объектом «Укрытие» (ОУ) и в настоящее время продолжают работы по его вводу в эксплуатацию. ОУ был построен в период с середины июня до 29 ноября 1986 г. На сегодняшний день внутри него содержится большое количество ядерного топлива, твердых и жидких радиоактивных отходов. В ОУ существует ряд потенциально опасных факторов, которые необходимо постоянно контролировать, изучать и принимать соответствующие меры для снижения потенциальной опасности. Основными из этих факторов являются: опасность обрушения конструкций ОУ, опасность возникновения самоподдерживающейся цепной реакции, высокие радиационные поля, радиоактивные аэрозоли и скопления радиоактивной воды.

### CFD-модель ОУ и НБК

Одним из способов анализа и прогнозирования поведения процессов внутри ОУ является компьютерное CFD-моделирование (англ. Computational fluid dynamics – вычислительная гидродинамика), которое позволяет прогнозировать распределение температур, влажности, скоростей воздуха и других величин, таких как концентрации примесей или фаз [1].

Для анализа и прогнозирования теплового, влажностного и радиационного состояния НБК и ОУ была разработана и верифицирована компьютерная 3-мерная CFD модель [2], отражающая их основную геометрическую структуру, физические свойства и процессы, такие как конвективный, кондуктивный и лучистый теплоперенос, вынужденное и естественное движение воздуха, выделение и распространение радиоактивных отходов, наличие водных скоплений, а также испарение и распространение влаги в воздухе (рис. 1).

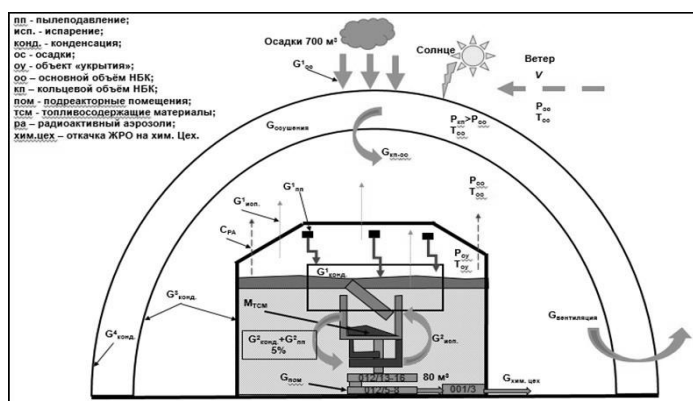


Рис. 1. Схема физических процессов, протекающих под НБК.

© М. А. Метель, П. Г. Круковский, Д. И. Скляренко, А. С. Полубинский, 2019

Трехмерная модель ОУ и НБК (Рис. 2) включает в себя объем кольцевого пространства с патрубками системы вентиляции, технологическое здание НБК, разрушенный 4-й блок и прилегающие к нему строения: деаэрационную этажерку (ДЭ), машинный зал, ВСРО и часть здания 3-го энергоблока ЧАЭС. Объем ДЭ предусматривает наличие принудительной вентиляции, объем ОУ – естественную вентиляцию через проемы в кровле.

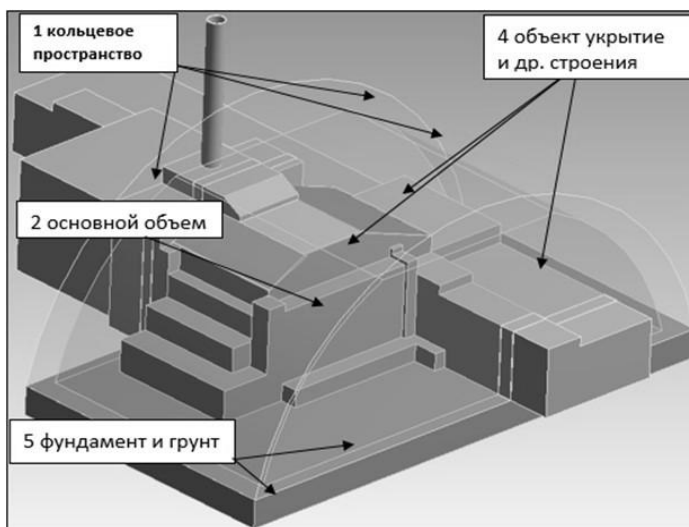


Рис. 2. Основные части объединенной модели НБК и ОУ.

Кольцевое пространство НБК с внутренней и внешней сторон ограничено оболочками, служащими для изоляции трубного каркаса НБК от окружающей среды. Также в объединенной модели ОУ и НБК представлены фундаменты опор НБК и слой грунта для учета их тепловой инерции.

Параметры воздухообмена и величины источников РА в ОУ идентифицировались путем решения обратных задач по данным измерений концентрации и скорости осаждения РА в подарочном пространстве НБК. Данные измерений аккумулирующих планшетов, аспирационных установок и других приборов получены от Института проблем безопасности АЭС НАН Украины.

### Подход к моделированию РА

РА в модели представлены как одна из фаз многофазной среды, при этом учитывается их подъем, распространение и оседание. Модель также позволяет учитывать аккумуляцию и подъем осевших РА (ресуспензию), что дает возможность получать распределение поверхностного загрязнения.

Математическая модель ресуспензии РА основывается на следующих принципах. Результирующий поверхностный поток РА,  $Q_{общ}$ , равен разнице потоков выброса  $Q_{подъем}$  и осаждения  $Q_{осед}$ :

$$Q_{общ} = Q_{подъем} - Q_{осед}. \quad (1)$$

Поверхностный поток оседания определяется законом Стокса

$$Q_{ос} = K_{dir} \cdot C_{vof} \cdot \rho_{ч} \cdot \frac{g \cdot V_{ч} \cdot (\rho_{ч} - \rho_{в})}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r}, \quad (2)$$

где  $K_{dir}$  – коэффициент, учитывающий пространственную ориентацию (гор. – 1, верт. – 0,1);  $C_{vof}$  – объемная доля второй фазы;  $\rho_{ч}$  – плотность частиц;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho_{в}$  – плотность воздуха;  $\eta$  – кинематическая вязкость воздуха ( $14,859 \cdot 10^{-6}$ );  $r$  – радиус частицы.

Определение потока поднимающихся РА

$$Q_{под} = k \cdot W^n \cdot K_{res} \cdot \sigma, \quad (3)$$

где  $\sigma$  – поверхностное загрязнение, кг/м<sup>2</sup>;  $k$  – коэффициент пропорциональности, определяет интенсивность подъема РА;  $W$  – скорость воздуха;  $K_{res}$  – коэффициент ресуспензии;  $n$  – показатель степени.

### Анализ распространения РА при вводе НБК в эксплуатацию

Для обеспечения адекватности CFD-модели НБК и ОУ была проведена ее верификация и идентификация ее параметров по данным измерений скорости осаждения и концентрации РА в воздухе ОУ и основном объеме (ОО) НБК в 2017 - 2018 гг.

После окончания монтажа герметизирующих мембран, изолировавших ОО НБК, концентрация РА в ОО выросла по сравнению с периодом отсутствия герметизирующих мембран, что объясняется уменьшением выноса РА из ОО НБК с воздушными потоками. Концентрация РА в подкровельном пространстве ОУ составляет в среднем порядка  $1 \text{ Бк/м}^3$  [3] и в несколько раз выше, чем в основном объеме НБК, т.е. легкая кровля ОУ служит барьером для распространения РА.

В CFD-модели НБК и ОУ источник РА геометрически расположен в объеме верхнего слоя завалов в центральном зале и оценивался по экспериментальным данным для всех источников РА в ОУ. Вентиляция НБК не функционирует, а гидравлическое сопротивление зазоров между стенами НБК и строениями выбрано таким, чтобы соответствовать состоянию частичной их герметизации, что имело место в 2017 - 2018 гг. Скорость ветра и температура окружающей среды приняты равными средним за период измерений. Результаты измерения и моделирования приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты усредненных измерений за 2017 - 2018 гг. и моделирования для периода ввода НБК в эксплуатацию

| Величина   | Измерения в 2017 – 2018 гг. | Модель |
|--|-----------------------------|--------|
| Концентрация РА в ОО, $\text{Бк/м}^3$  | 0,05 - 0,9                  | 0,5    |
| Концентрация РА в ОУ (система “Байпас”), $\text{Бк/м}^3$                               | ~0,9                        | 0,9    |
| Плотность осаждения РА на легкую кровлю ОУ, $\text{кБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ | ~2,0                        | 2,7    |

Как видно из таблицы, результаты расчетов в целом показывают качественную и количественную корреляцию результатов моделирования с результатами проведенных измерений для периода ввода НБК в эксплуатацию в 2017 - 2018 гг.

В результате моделирования также были получены распределения концентраций РА, показанные на рис. 3. Концентрации РА в ОО НБК после установки герметизирующих мембран возросли по сравнению с периодом их отсутствия, что объясняется уменьшением выноса РА из ОО с воздушными потоками. Как видно на рисунке, концентрация РА в центральном зале ОУ приблизительно в два раза выше, чем в ОО НБК.

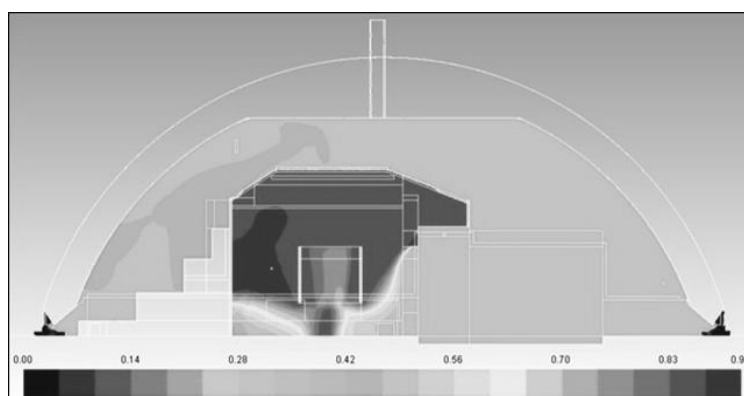


Рис. 3. Распределение концентраций РА под НБК в период ввода НБК в эксплуатацию в 2017 – 2018 гг.

### Моделирование распределения концентрации РА при разборке кровли машинного зала

В ноябре - декабре 2017 г. проводилась частичная разборка кровли машинного зала 4-го энергоблока ЧАЭС, целью которой было снизить пожарную нагрузку под НБК, так как на кровле машинного зала содержалось большое количество потенциально горючих материалов.

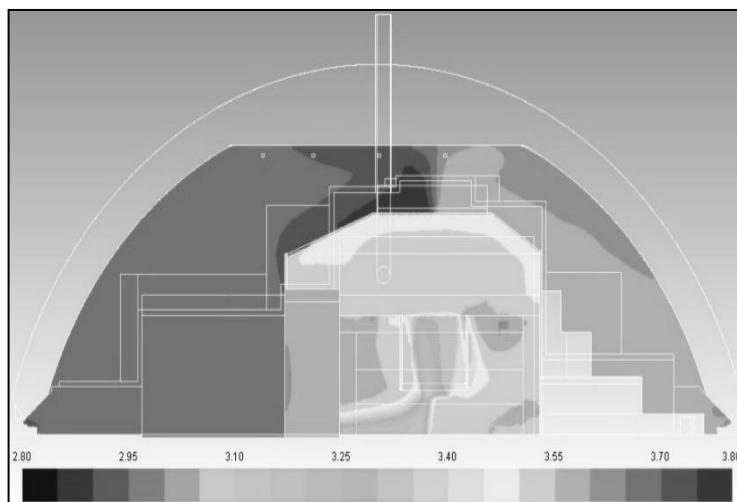
При проведении этих работ наблюдалось значительное повышение плотности осаждения РА на аккумуляющих планшетах до значения примерно  $7 \text{ кБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ .

Для данного сценария повышения выбросов РА было проведено моделирование распространения РА в ОО НБК с помощью объединенной модели НБК и ОУ. При этом использовались условия и параметры модели, аналогичные рассмотренным выше условиям и параметрам модели для ввода НБК в эксплуатацию, за исключением того, что на кровле машинного зала был задан дополнительный источник РА, приводящий к повышению плотности осаждения РА на горизонтальных поверхностях под НБК при разборке кровли машинного зала (табл. 2).

**Таблица 2. Результаты измерений и моделирования плотности осаждения РА на горизонтальных поверхностях под НБК при разборке кровли машинного зала**

| Величина  | Значение |
|---|----------|
| Источник РА в ОУ, Бк/с  | 2,5      |
| Источник РА на кровле машинного зала (оценка при моделировании), Бк/с                 | 4        |
| Средняя концентрация РА в основном объеме НБК (моделирование), Бк/м <sup>3</sup>      | 1,8      |
| Средняя измеренная концентрация РА в подкровельном пространстве ОУ, Бк/м <sup>3</sup> | 1,7      |
| Средняя плотность осаждения РА (моделирование), кБк/(м <sup>2</sup> ·сут)             | 9,6      |
| Средняя измеренная плотность осаждения РА, кБк/(м <sup>2</sup> ·сут)                  | до ~7,0  |

Для данного варианта расчетов получены распределения концентраций, приведенные на рис. 4. Результаты расчетов позволили оценить величину дополнительного источника выброса на крыше машинного зала при выполнении работ по частичному демонтажу кровли. Существенное повышение концентрации РА вследствие работ возникает из-за того, что они проводятся в замкнутом объеме, в котором в данный момент, до введения НБК в эксплуатацию, не функционирует система вентиляции.



**Рис. 4. Распределение концентраций РА в ОУ и НБК во время частичной разборки крыши машинного зала.**

### **Оценка распространения РА при эксплуатации НБК при снятой легкой кровле ОУ**

Для предварительной оценки радиационного состояния ОО НБК во время эксплуатации (зазоры герметизированы, система вентиляции функционирует) с помощью совместной модели ОУ и НБК были проведены расчеты для условий наличия и отсутствия легкой кровли ОУ.

Основной целью таких расчетов было проверить, будет ли снятие легкой кровли ОУ приводить к повышению концентрации РА в ОО НБК. Вывод о таком повышении выбросов может быть сделан на основании сравнения скоростей воздуха в помещениях под центральным залом ОУ в случае наличия и отсутствия легкой кровли при прочих равных условиях.

Для расчетов были выбраны следующие условия: зазоры в ограждающих контурах Арки НБК герметизированы, система вентиляции НБК функционирует, параметры метеорологических условий приняты равными среднегодовым.

В результате расчетов получены значения концентрации РА в ОО НБК и в подкровельном пространстве ОУ, а также средние скорости воздуха в объемах завалов ОУ, представленные в табл. 3.

**Таблица 3. Сравнение концентраций РА под НБК и скоростей воздуха в помещениях под центральным залом при наличии и отсутствии легкой кровли ОУ**

| Величина  | Кровля присутствует | Кровля демонтирована |
|---|---------------------|----------------------|
| Концентрация РА в ОО НБК, Бк/м <sup>3</sup>                 | 0,06                | 0,07                 |
| Концентрация РА в центральном зале ОУ, Бк/м <sup>3</sup>    | 0,22                | 0,08                 |
| Скорость воздуха в помещениях под центральным залом ОУ, м/с | 0,218               | 0,24                 |

Для данных вариантов расчетов также получены распределения концентраций РА в воздухе, показанные на рис. 5.

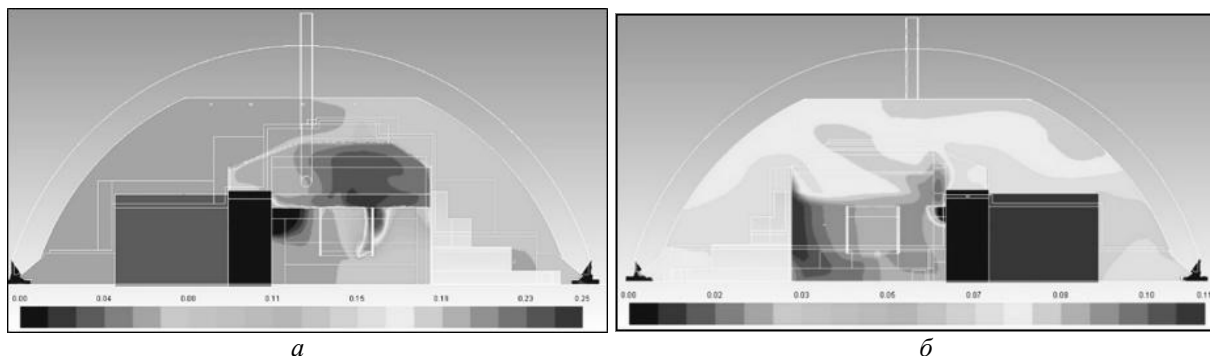


Рис. 5. Распределение концентраций РА в ОУ и основном объеме НБК при наличии (а) и отсутствии (б) легкой кровли ОУ.

Результаты расчетов показывают, что в режиме эксплуатации существенно снижается концентрация РА в ОО НБК и в подкровельном пространстве ОУ по сравнению с периодом ввода НБК в эксплуатацию. Это объясняется влиянием работы вентиляции НБК, которая обеспечивает удаление РА из ОО НБК. Анализ результатов также показывает, что демонтаж легкой кровли ОУ приведет к выравниванию концентрации РА в объемах подкровельного пространства ОУ и ОО НБК.

### Оценка аэрозольной обстановки в ОО НБК при извлечении и погрузке радиоактивных отходов в контейнер

Моделирование выбросов РА во время работ по извлечению и погрузке радиоактивных отходов (РАО) только из центрального зала ОУ было проведено с учетом возможности осаждения аэрозолей. Расчеты основаны на исходных данных и условиях сценария, описанных авторами статьи [4], которые провели аналогичную оценку на основе аналитического решения дифференциального уравнения баланса РА в ОО НБК.

При моделировании использовалась массовая скорость выброса аэрозоля 0,316 кг/ч, оцененная авторами [4], при удельной активности РА  $1 \cdot 10^8$  Бк/кг. Таким образом, интенсивность выброса  $E = 3,16 \cdot 10^7$  Бк/ч. Такой выброс происходит периодически во время работ по погрузке РАО (2 смены по 2 часа с перерывом в 2 часа).

Из центрального зала ОУ аэрозоль распространяется по ОО НБК и в конечном итоге выбрасывается вытяжной вентиляцией (1,4 объема НБК за сутки), а также осаждается на поверхностях под НБК.

В результате расчетов были получены поля распределения значений концентрации РА в ОО НБК во времени (рис. 6).

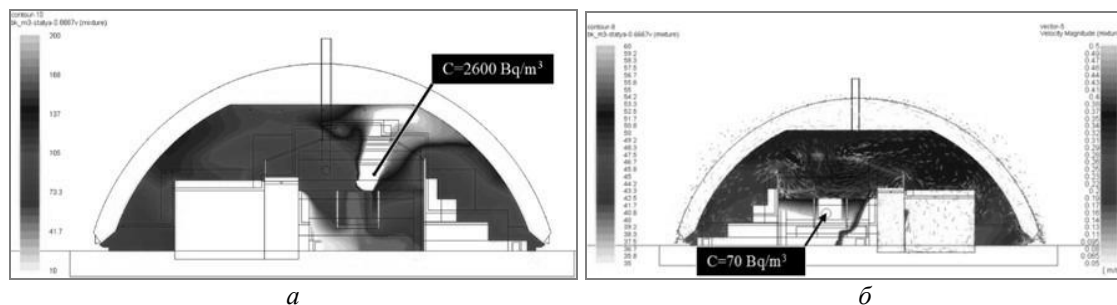


Рис. 6. Концентрации РА в объеме НБК после 6 (а) и 12 (б) часов с начала проведения работ.

Учет осаждения РА позволил получить распределение поверхностного загрязнения после 10 суток работ по удалению РАО (Бк/м<sup>2</sup>) (рис. 7).

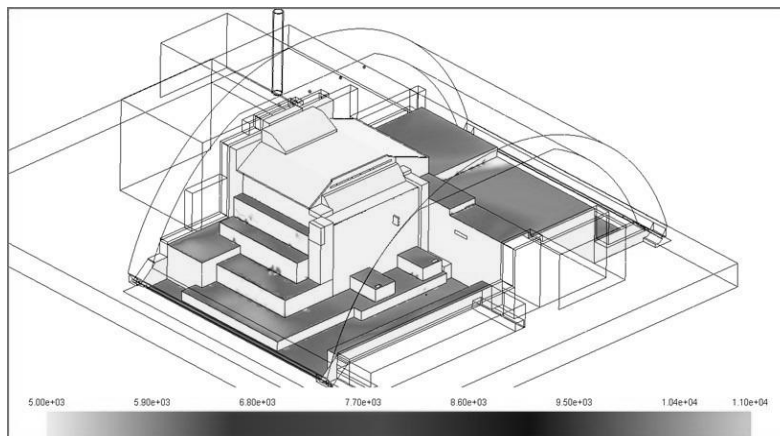


Рис. 7. Поверхностное загрязнение после 10 суток работ по удалению РАО.

Из результатов расчетов видно, что зависимости средней объемной концентрации РА, полученные в результате моделирования, близки к результатам работы [4], но CFD-модель показала, что концентрация РА вблизи места проведения работ в определенные моменты времени может достигать ~2600 Бк/м<sup>3</sup>.

### Выводы

Результаты расчетов, полученных на модели ОУ и НБК для условий ввода в эксплуатацию НБК, удовлетворительно коррелируют с результатами измерений концентрации РА в воздухе ОО НБК и плотности осаждения РА на поверхности под НБК, проведенных в 2017 - 2018 гг.

Моделирование сценария повышения концентрации РА, произошедшего вследствие проведения работ по частичному демонтажу кровли машинного зала, позволило определить приблизительную величину дополнительного выброса на уровне 4 Бк/с (0,35 МБк/сут).

Проведено моделирование для условий эксплуатации НБК при включенной системе вентиляции для двух случаев: при наличии легкой кровли ОУ и после ее демонтажа. Демонтаж легкой кровли приведет к выравниванию концентрации РА в объемах центрального зала ОУ и ОО НБК.

Результаты модельных расчетов показывали, что концентрация РА в ОО НБК снижается до 0,07 - 0,08 Бк/м<sup>3</sup> по сравнению с периодом до ввода НБК в эксплуатацию. Это объясняется работой системы вентиляции ОО НБК, обеспечивающей вытяжку РА.

Рассмотрен сценарий повышенного выброса РА в подарочное пространство при работах по извлечению РАО из центрального зала ОУ при моделировании распространения и осаждения РА на поверхностях под НБК. Доля осажденных аэрозолей составляет приблизительно 16 % при среднем размере частиц 2 мкм. Расчеты с размерами частиц 5 и 7 мкм показали, что доля осажденных РА значительно возрастает с ростом размера частиц и может составлять до 30 – 45 % от общего их количества. Сравнение результатов моделирования с аналогичной оценкой, проведенной в [4], показало близость усредненных концентраций РА в ОО НБК, однако трехмерное распределение концентрации РА, полученное в модели, неравномерное и в отдельных местах может отличаться на порядки величины.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Patankar S. V.* Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. – Hemisphere Publishing Corporation. – 1980. – ISBN 0891165223.
2. *Krukovskiy P.* 3D CFD model of thermogasdynamic state of the New Safe Confinement of Chernobyl NPP / P. Krukovskiy, V. Oliinyk, M. Metel // International Journal of Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 3. – P. 109 – 118.
3. *Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2015 - 2016 гг.* / А. С. Лагуненко, В. Е. Хан, А. К. Калиновский, В. А. Краснов, В. А. Кашпур, С. А. Довыдьков // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чорнобиля. – 2017. – Вип. 29. – С. 69 – 77.

4. *Динаміка зміни концентрації радіоактивних аерозолів під час вилучення паливовміщуючих матеріалів з об'єкта "Укриття" / В. Г. Батій, А. О. Сізов, Д. В. Федорченко, А. О. Холодюк // Ядерна та радіаційна безпека. – 2015. – Вип. 4. – С. 41 – 44. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ydpb\\_2015\\_4\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ydpb_2015_4_10).*

**М. А. Метель, П. Г. Круковський, Д. І. Скляренко, А. С. Полубінський**

*Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03057, Україна*

**, CFD-АНАЛІЗ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РАДІОАКТИВНИХ АЕРОЗОЛІВ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ НОВОГО БЕЗПЕЧНОГО КОНФАЙНМЕНТА**

Представлено результати аналізу та прогнозування розповсюдження радіоактивних аерозолів (РА) в новому безпечному конфайнменті (НБК) у різних умовах. Розглянуто умови введення в експлуатацію НБК, його експлуатації, демонтажу конструкцій об'єкта «Укриття» (ОУ) та вилучення радіоактивних відходів із центрального залу ОУ. Такий аналіз і прогнозування виконані з використанням комп'ютерної моделі обчислювальної гідродинаміки ОУ та НБК. Модель враховує осідання, накопичення та вторинні викиди РА на поверхнях під НБК, що дозволяє отримувати розподіл поверхневого забруднення та визначати місця найбільшого забруднення.

*Ключові слова:* радіоактивні аерозолі, новий безпечний конфайнмент, поверхнєве забруднення, об'ємна концентрація, 3D комп'ютерне моделювання.

**M. A. Metel, P. G. Krukovskyi, D. I. Sklyarenko, A. S. Polubinskyi**

*Institute of Technical Thermophysics, NAS of Ukraine, Zhelyabova str., 2a, Kiev, 03057, Ukraine*

**CFD-ANALYSIS AND PREDICTION OF THE RADIOACTIVE AEROSOLS DISTRIBUTION DURING OPERATION OF NEW SAFE CONFINEMENT**

The purpose of the work is the verification, analysis, and forecasting of the spread of radioactive aerosols (RA) under the New Safe Confinement (NSC) and Shelter object (SO) using the developed computer model. Concentrations of RA are analyzed after turning on the ventilation system and during various activities or events that may be accompanied by increased emissions of RA. SO and NSC CFD model. One of the methods for analyzing and prediction the behavior of processes within an SO is computer CFD modeling (Computational Fluid Dynamics), which makes it possible to predict the distribution of temperatures, humidity, air velocities and other values, such as concentrations of species or phases. Approach to RA modeling. Such analysis and forecasting was performed using computer CFD model of the SO and NSC. The model takes into account important physical processes, such as heat, air, humidity and RA transfer, taking place in the SO and NSC, the necessity of their analysis and forecasting, which eventually determine the safety of people and the 100-year lifetime of the NSC. The model takes into account sedimentation, accumulation and secondary dust emissions on the surfaces under the NSC, which allows obtaining distributions of surface contamination and determine the places of the highest contamination. RA in the model are presented as one of the phases of a multi-phase medium, taking into account the processes of their transfer with air streams, due to diffusion, including turbulent, RA emissions from the central hall of the Shelter and their gradual subsidence under the action of gravity. The results of analysis and forecasting of the RA spread in the NSC under various conditions are presented. The conditions for the commissioning NSC, operation, dismantling of the SO (early dismantling) and removal of radioactive waste from the central hall of the SO are considered.

*Keywords:* radioactive aerosols, new safe confinement, surface contamination, volume concentration, 3D computer modeling.

REFERENCES

1. *Patankar, S. V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. – Hemisphere Publishing Corporation. – 1980. – 214 p. – ISBN 0891165223.*
2. *Krukovskyi P. 3D CFD model of thermogasdynamic state of the New Safe Confinement of Chernobyl NPP / P. Krukovskyi, V. Oliinyk, M. Metel // International Journal of Mechanical Engineering. – 2018. – Vol. 3. – P. 109 – 118.*
3. *Control of releases of radioactive aerosols from the "Shelter" object in 2015 – 2016 / A. S. Lagunenka, V. E. Khan, A. K. Kalinovsky, V. A. Krasnov, V. A. Kashpur, S. A. Dovydkov // Problemy bezpeky atomnykh electrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chernobyl). – 2017. – Iss. 29. – P. 69 – 77. (Rus)*
4. *Dynamics of changes in concentration of radioactive aerosols during removal of fuel-containing materials from the "Shelter" object / V. G. Batiy, A. O. Sizov, D. V. Fedorchenko, A. O. Holodyuk // Yaderna ta radiaciyna bezpeka (Nuclear and radiation safety). – 2015. – № 4. – P. 41 – 44. (Ukr)*

Надійшла 14.01.2019

Received 14.01.2019