УДК 621.396.6.019:536.5.001.24

АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА РАДИОАКТИВНОЙ ПЫЛИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НОВОГО БЕЗОПАСНОГО КОНФАЙНМЕНТА ЧАЭС

Круковский П.Г., докт. техн. наук, Метель М.А., Дейнеко А.И., Скляренко Д.И.

Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев-57, 03057, Украина<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.10>

Представлені результати аналізу та прогнозування поширення радіоактивних аерозолів (РА) в новому безпечному конфайнменті (НБК) в різних умовах. Розглядаються умови для введення в експлуатацію НБК, експлуатації, демонтажу об'єкта «Укриття» (ОУ) (раннього демонтажу) та видалення радіоактивних відходів з центрального залу ОУ. Такий аналіз та прогнозування проводили за допомогою комп'ютерної CFD (обчислювальна гідродинаміка) моделі ОУ та НБК. Модель враховує осідання, накопичення та вторинні викиди пилу на поверхнях під НБК, що дозволяє отримувати розподіл поверхневого забруднення та визначати місця найбільшого забруднення.

Представлены результаты анализа и прогнозирования распространения радиоактивных аэрозолей (РА) в новом безопасном конфайнменте (НБК) в различных условиях. Рассмотрены условия для ввода в эксплуатацию НСК, эксплуатации, демонтажа объекта «Укрытия» (ОУ) (ранний демонтаж) и удаления радиоактивных отходов из центрального зала ОУ. Такой анализ и прогнозирование проводились с использованием компьютерной CFD (вычислительная гидродинамика) модели ОУ и НБК. Модель учитывает осаждение, накопление и вторичные выбросы пыли на поверхности под НБК, что позволяет получать распределения поверхностного загрязнения и определять места наибольшего загрязнения.

The results of analysis and forecasting of the radioactive aerosols (RA) spread in the New Safe Confinement (NSC) under various conditions are presented. The conditions for the commissioning NSC, operation, dismantling of the OS (early dismantling) and removal of radioactive waste from the central hall of the OS are considered. Such analysis and forecasting was performed using computer CFD (computational fluid dynamics) model of the OS and 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.

Библ. 5, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: авария на ЧАЭС, новый безопасный конфайнмент, разборка объекта «Укрытия», CFD моделирование, концентрация радиоактивного аэрозоля.

Q – поток массы;
 K – коэффициент;
 C – объёмная доля;
 V – объём;
 r – радиус;
 W – скорость воздуха;
 K – коэффициент ресуспензии;
 ρ – плотность;
 π – математическая постоянная;
 η – Кинематическая вязкость;
 σ – поверхностное загрязнение.

Индексы нижние:

общ – общий поток;
 под – подъёмный поток;
 ос – оседающий поток;
 ч – частичка;
 dir – учет ориентации поверхности;
 vof – учет второй фазы;
 res – учет ресуспензии.

Индексы верхние:

n – показатель степени.

Новый Безопасный Конфайнмент (НБК) был установлен в проектное положение над объектом «Укрытие» (ОУ) Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС) и в настоящее время продолжают работы по его вводу в эксплуатацию. Объект «Укрытие» представляет собой структуру, спешно построенную в период с середины июня до 29 ноября 1986 года. Сейчас это частично разрушенная конструкция, все еще содержащая большое количество ядерного топлива и других 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 каждого из них. Основными из этих факторов являются: опасность обрушения конструкций ОУ, ядер-

ная безопасность, высокие радиационные поля, радиоактивные аэрозоли и скопления воды.

Моделирование радиоактивных аэрозолей внутри ОУ ЧАЭС рассматривается в работе [1], но в работе не учитывается оседание частиц на поверхности под действием силы тяжести.

В данной работе рассмотрены вопросы анализа и прогнозирования распространения радиоактивных аэрозолей (РА) под НБК при помощи разработанной компьютерной модели. Анализируются концентрации радиоактивных аэрозолей после включения системы вентиляции и при проведении различных работ либо событий, которые могут сопровождаться повышенными выбросами РА.

CFD-модель ОУ и НБК. Одним из способов ана-

лиза 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 [2].

Для НБК и ОУ была разработана и верифицирована компьютерная 3-х мерная CFD (computational fluid dynamics) модель [3], отражающая их основную геометрическую структуру, физические свойства и процессы, такие как теплоперенос, вынужденное и естественное тепловое движение воздуха, выделение и распространение РА, наличие водных скоплений, испарение и распространение влаги в воздухе (Рис. 1).

Трехмерная модель ОУ и НБК (рис. 2) включает в себя объем кольцевого пространства (КП) с патрубками системы вентиляции, технологическое здание НБК, Объект «Укрытие» и прилегающие к нему строения: деаэрационная этажерка, машинный зал, блоки Б, вспомогательные системы реакторного отделения (ВСРО) и часть здания 3-го энергоблока ЧАЭС. Объем деаэрационной этажерки (ДЭ) предусматривает наличие принудительной вентиляции, объем ОУ – естественную вентиляцию через проемы в крыше.

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 представлено технологическое здание, фундаменты опор НБК, вентиляционные системы ОО и кольцевого пространства (КП) НБК.

Недостаточно точно известные параметры модели (воздухообмен и источники РА в ОУ, и др.) уточнялись путем решения задач идентификации параметров по данным измерений концентрации и скорости оседания РА в подарочном пространстве НБК. Данные измерений накопительных планшетов, аспирационных установок и др. приборов, получены от Института проблем безопасности АЭС.

Подход к моделированию радиоактивных аэрозолей. Радиоактивные аэрозоли в модели представлены как одна из фаз многофазной среды, при этом учитываются процессы их переноса с потоками воздуха, за счет диффузии, в том числе турбулентной, выбросы РА из центрального зала ОУ и их постепенное оседание под действием силы тяжести. Одним из важных дополнений модели стал учет в ней оседания, накопления и вторичного пылеподъема (ресуспензии) на поверхностях под НБК, что дает возможность получать распределения поверхностного загрязнения и определять места наибольшего загрязнения.

Математическая модель вторичного пылеподъема основывается на следующих принципах. Результирую-

Рис. 1. Схема физических процессов, протекающих в ОУ и НБК.

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

щий поверхностный поток РА $Q_{\text{общ}}$ равен сумме потока оседания $Q_{\text{ос}}$ и потока выброса $Q_{\text{под}}$:

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\text{под}} - Q_{\text{ос}}, \quad (1)$$

Поверхностный поток оседания определяется законом Стокса:

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

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

Определение потока поднимающейся пыли $Q_{\text{под}}$:

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

где σ – поверхностное загрязнение ($\text{кг}/\text{м}^2$), k – коэффициент пропорциональности, определяет интенсивность подъема пыли, W – скорость воздуха, K_{res} – коэффициент ресуспензии, n – показатель степени.

Анализ распространения РА при вводе НБК в эксплуатацию. Проведен ряд расчетов на CFD модели НБК и ОУ в ходе которых проведена верификация и уточнение параметров модели по данным измерений 2017, 2018 г., а также рассмотрены сценарии распро-

странения РА во время ввода НБК в эксплуатацию и его эксплуатации.

Целью расчетов было верифицировать CFD модель и настроить ее параметры по измерениям скорости оседания и концентрации РА в ОУ и ОО НБК, проведенным в последнее время.

Анализ измерений и результатов расчетов показывает, что во время ввода НБК в эксплуатацию после герметизации зазоров под стенами НБК, концентрации РА в основном объеме НБК выросли по сравнению с периодом отсутствия герметизирующих мембран, что объясняется уменьшением выноса РА из основного объема НБК с воздушными потоками. Концентрация РА в центральном зале (ЦЗ) ОУ составляет в среднем порядка $1 \text{ Бк}/\text{м}^3$ [4] и в несколько раз выше чем в основном объеме НБК, т.е. крыша ОУ служит барьером для распространения РА.

Источник РА моделируется как объемный источник массы, распределенный по объему полуразрушенных помещений 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 взяты равными средним за период измерений. Результаты расчетов в сравнении с измерениями приведены в табл. 1.

Как видно из таблицы, результаты расчетов в целом показывают качественную и количественную близость результатов расчетов с результатами проведенных измерений в соответствующие периоды.

В результате расчетов также получены распределе-

Табл. 1. Результаты моделирования в сравнении с осредненными результатами измерений за 2017 г. для периода ввода НБК в эксплуатацию.

Величина	Измерения (2017-2018г)	Модель
Концентрация РА в ОО [Бк/м³]	0,05-0,9	0,46
Концентрация РА в ОУ (система “байпас”), [Бк/м³]	~0,9	0,87
Скорость оседания РА на крыше ОУ, [кБк/(м²·сут)]	~2,0	2,65

ния концентрации РА показанное на рис. 3.

Из результатов расчетов видно, что концентрации РА в основном объеме НБК выросли по сравнению с периодом отсутствия герметизирующих мембран, что объясняется уменьшением выноса РА из объема ОО НБК с воздушными потоками. Рис. 3 показывает, что концентрация РА в ЦЗ ОУ приблизительно в 2 раза выше чем в ОО НБК.

Анализ распространения РА при извлечении и погрузке радиоактивных отходов (РАО) в контейнер. Моделирование выбросов РА во время работ по погрузке

и транспортировке радиоактивных отходов из центрального зала ОС было проведено с учетом возможности осаждения аэрозолей. Расчеты основаны на исходных данных и условиях сценария, описанных авторами статьи [5], которые провели аналогичную оценку на основе аналитического решения дифференциального уравнения баланса РА в основном объеме НБК.

Интенсивность выброса РА (массовая) принята равной 0,316 кг/час. Активность РА составляет $1 \cdot 10^8$ Бк/кг. Таким образом, интенсивность выброса равна $E = 3,16 \cdot 10^7$ Бк/час. Такой выброс происходит пе-

Рис. 3. Распределение концентраций РА (Бк/м³) под НБК в период ввода в эксплуатацию.

Рис. 4. Концентрации РА (Бк/м³) в объеме НБК после 6 (а) и 12 (б) часов с начала проведения работ.

Рис. 5. Поверхностное загрязнение после 10 дней работ по удалению РАО (Бк/м²).

риодически во время работ по погрузке РАО (2 смены по 2 часа с перерывом в 2 часа).

Выделенная пыль распространяется по объему НСК и в конечном итоге высасывается вытяжной вентиляцией (1,4 объема НБК/день) и осаждается на горизонтальных поверхностях основного объема НБК.

В результате расчетов были получены поля концентрации РА в основном объеме НБК в различные моменты времени, представленные на рис. 4.

Учет осаждения позволил получить распределение поверхностного загрязнения после 10 дней работы по удалению РАО (Бк/м²) (рис. 5).

Из результатов расчетов видно, что зависимости средней объемной концентрации РА, полученные в результате моделирования, близки к результатам работы [5], но CFD-модель показала, что локальные концентрации РА вблизи места проведения работ в определенные моменты времени может достигать ~ 2600 Бк/м³, что значительно превышает безопасное значение.

Выводы

1. Результаты моделирования для условий ввода в эксплуатацию НБК демонстрируют близость расчетных и измеренных показателей концентрации РА в центральном зале ОУ, скорости осаждения РА на крыше ОУ, и концентрации в ОО НБК.

2. При рассмотрении сценария повышенного выброса при работах по извлечению РАО из ЦЗ ОУ видно, что за учет осаждения РА приводит к ускорению снижения концентрации РА в ОО НБК во времени. Доля осажденных аэрозолей составляет приблизительно 16% от общего выброса при среднем размере частиц 2 мкм.

Расчеты с другими размерами частиц, например, 5 и 7 мкм, показали, что доля осажденных РА значительно возрастает с ростом размера частиц и может составлять до 30-45% от общего выброса. Сравнение с аналогичной оценкой, проведенной в [4], показало близость осредненных концентраций в ОО НБК, однако в локальных местах отличия могут быть очень существенными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батий В. Г., Егоров В. В., Рубежанский Ю. И. Математическое моделирование процесса распространения радиоактивных аэрозолей внутри радиационно-опасных объектов // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. – 2007. – Вып. 7. – С. 55-61.
2. Patankar, Suhas V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. - Hemisphere Publishing Corporation. - 1980. - P. 214. - ISBN 0891165223.
3. Krukovskyi P., Oliinyk V., Metel M. 3D CFD model of thermogasdynamic state of the New Safe Confinement of Chernobyl NPP // International Journal of Mechanical Engineering. - 2018. - Vol. 3. - P. 109-118.
4. Лагуненко А. С., Хан В. Е., Калиновский А. К., Краснов В. А., Кашир В. А., Довыдьков С. А. Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «УКРЫТИЕ» в 2015 - 2016 гг. // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. – 2017. Вып. 29. – С. 69 – 77.
5. Батий В. Г., Сізов А. О., Федорченко Д. В., Холодюк А. О. Динаміка зміни концентрації радіоактивних аерозолів під час вилучення паливовміщуючих матеріалів з об'єкта "Укриття" // Ядерна та радіаційна безпека. - 2015. - Вып. 4. - С. 41-44.

ANALYSIS AND PREDICTION OF RADIOACTIVE DUST TRANSFER AT THE NEW SAFE CONFINEMENT OF CHNPP OPERATION

Krukovsky P.G., Metel M.A., Deineko A.I., Skliarenko D.I.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Zhelyabova, 2a, Kyiv-57, 03057, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/ihe.4.2018.10>

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 radioactive aerosols are analyzed after turning on the ventilation system and during various activities or events that may be accompanied by increased emissions of RA.

CFD model SO and NSC. 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 impurities or phases.

Approach to radioactive aerosol modeling. Radioactive aerosols in the model are presented as one of the phases of a multiphase 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.

Results. The results of analysis and forecasting of the radioactive aerosols (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. 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 radioactive aerosols (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.

References 5, tables 1, figures 5.

Key words: Chernobyl accident, new safe confinement, dismantling of the Shelter, CFD modeling, radioactive aerosol concentration.

1. Batiy V. G., Egorov V. V., Rubezhansky Yu. I. [Mathematical modeling of the propagation process of radioactive aerosols inside radiation-hazardous objects] // Problem bezopastnosti atomnih stanciy i chernobilya [Problems of safety of nuclear power plants and chornobylys]. 2007. №7. P. 55-61. (Rus)

2. Patankar, Suhas V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. - Hemisphere Publishing Corporation. 1980. P. 214. ISBN 0891165223.

3. Krukovsky P., Oliynyk V., Metel M. [3D CFD model of thermogasdynamic state of the New Safe Confinement of Chernobyl NPP], International Journal of Mechanical Engineering. 2018. Vol. 3. P. 109-118.

4. Lagunencko A.S., Khan V.E., Kalinovskiy A.K., Krasnov V.A., Kashpur V.A., Dovydkov S.A. [Control of emissions of radioactive aerosols from the "Shelter" object in 2015 – 2016], Problem bezopastnosti atomnih stanciy i chernobilya [Problems of safety of nuclear power plants and chornobylys]. 2017. №29. P. 69 - 77. (Rus).

5. Batiy V.G., Sizov A.O., Fedorchenko D.V., Holodyuk A.O. [Dynamics of changes in concentration of radioactive aerosols during removal of fuel-containing materials from the "Shelter" object], Yadernaya i radiacionaya bezopastnost [Nuclear and radiation safety]. 2015. №4. P. 41-44. (Ukr).

Отримано 09.11.2018

Received 09.11.2018