

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ CFD-МОДЕЛИ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОГО И РАДИАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА НОВОГО БЕЗОПАСНОГО КОНФАЙНМЕНТА

Круковский П.Г., д-р техн. наук, Тадля О.Ю., канд. техн. наук, Дейнеко А.И., Метель М.А.

Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев-57, 03057, Украина

Викладена необхідність і переваги використання CFD-моделей в системі моніторингу стану тепловологісного і радіаційного стану Нового Безпечного Конфайнмента (НБК), як особливо важливого об'єкта, який повинен забезпечити радіаційну безпеку Об'єкта Укриття Чорнобильської АЕС. Запропоновано схему моніторингу стану НБК, істотно доповнює і розширює можливості проєктованої системи моніторингу параметрів НБК. Викладено особливості та проблеми застосування CFD-моделей в такому моніторингу.

Изложена необходимость и преимущества использования CFD-моделей в системе мониторинга состояния тепловлажностного и радиационного состояния Нового Безопасного Конфайнмента (НБК), как особо важного объекта, который должен обеспечить радиационную безопасность Объекта «Укрытия» (ОУ) Чернобыльской АЭС. Предложена схема мониторинга состояния НБК, существенно дополняющая и расширяющая возможности проектируемой системы мониторинга параметров НБК. Изложены особенности и проблемы применения CFD-моделей в таком мониторинге.

It is shown the relevance and advantages of the CFD-models application in the monitoring system of the thermal, humidity and radiation state of the New Safe Confinement (NSC) as an object of particular importance aimed to ensure radiation safety of the Shelter Object of the Chernobyl NPP. Described scheme of the NSC state monitoring essentially complements and extends the capabilities of the designed monitoring system of the NSC parameters. The features and problems of CFD-models application for such a monitoring system are shown.

Библ. 12, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: Новый Безопасный Конфайнмент, Объект «Укрытие», радиационная безопасность, мониторинг состояния, CFD-модель.

После Чернобыльской аварии прошло уже 30 лет, а разрушенный 4-й блок ЧАЭС до сих пор является объектом повышенной радиационной опасности. Построенный в 1986 году Объект Укрытие (ОУ) постепенно разрушается, поэтому в 2007 году было принято решение о сооружении Нового Безопасного Конфайнмента (НБК), который будет служить преградой распространению радиоактивной пыли и аэрозолей при демонтаже 4-го блока и ОУ (рис. 1). Этот строительный объект нестандартных размеров и формы должен прослужить 100 лет, для чего необходим постоянный контроль и прогнозирование его термогазодинамического, влажностного и радиационного состояния.

Постановка проблемы

Детальные расчеты такого состояния и прогноза можно выполнить только с помощью современных методов компьютерного моделирования на основе CFD (Computational Fluid Dynamics) моделей, адекватно описывающих необходимые физические процессы, происходящие с этим объектом в различных условиях. Также необходимо не просто следить за показателями параметров объекта в отдельных точках (так называемый мониторинг параметров), но и иметь возможность получать распределение значений этих параметров по всему объекту, уметь предсказать достижение критических значений параметров и определить необходимые решения для предотвращения возникновения внештатных ситуаций.

Согласно [1], мониторинг состояния это наблюдение за состоянием объекта для определения и пред-

сказания момента перехода в предельное состояние. Принципиальным отличием мониторинга состояния от мониторинга параметров является наличие интерпретатора измеренных параметров или же экспертной системы поддержки принятия решений о характеристиках состояния объекта и дальнейшем управлении им.

На сегодня функционируют системы мониторинга параметров только ОУ "Сигнал" и "Финиш-Р", которые автоматически в определенных точках объекта измеряют параметры радиационного фона, передают и хранят эту информацию в таблицах контроля параметров на протяжении года.

Основной проблемой НБК является опасное воздействие повышенного радиационного фона в основном объеме на персонал, который будет работать там при разборке завалов ОУ. Крыша и стены ОУ имеют большое количество щелей и неплотностей, через которые будет проникать воздух и радиоактивные загрязнения в основной объем НБК, а оттуда в окружающую среду. Из-за перепадов температур внутри ОУ и НБК, которые зависят от времени года, режима работы персонала в ОУ при разборке завалов, тепловое состояние НБК и др. параметров внутри НБК возникнут нестационарные термогазодинамические процессы: тепловая конвекция, лучистый теплообмен и движение воздуха вследствие существующих в ОУ перепадов температуры между отдельными зонами, где есть топливосодержащие материалы (ТСМ). Лучше всего эти процессы описываются так называемыми CFD-моделями, использующими наиболее общие и полные математические описания физических процессов.

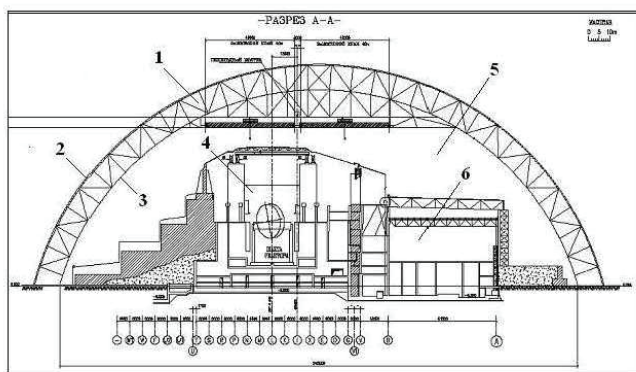


Рис. 1. Схемы Объекта Укрытие и Нового Безопасного Конфайнмента.
 1 – стальные конструкции и кольцевое пространство Арки НБК, 2 – наружная оболочка, 3 – внутренняя оболочка, 4 – Объект «Укрытие» и разрушенный реактор, 5 – основной объем НБК, 6 – машзал.

Планируется система мониторинга параметров для НБК [2], но актуальной задачей является ее совершенствование путем интеграции в нее трехмерной модели термогазодинамического и радиационного состояния. Такая модель теплового, газодинамического и радиационного состояния НБК и ОУ позволит анализировать и прогнозировать последствия распространения РА внутри объема НБК и в окружающей среде, а также выбирать оптимальные меры по радиационной защите персонала, который работает внутри НБК. Разработанная CFD-модель будет использовать данные измеренных параметров объекта для повышения точности модели путем идентификации ее параметров. Это позволит использовать ее в системе мониторинга состояния для прогнозирования различных ситуаций как в нормальных условиях эксплуатации НБК, так и в условиях аварий и повышенных выбросов, а также в случаях отказов инженерного оборудования НБК.

Сформулированы следующие требования к системе мониторинга состояния:

1. Наличие CFD-модели объекта, детально описывающей состояние объекта.

2. Взаимодействие модели с измеряемыми параметрами объекта.

3. Наличие процедуры идентификации характеристик модели по данным измерений в отдельных точках объекта.

4. Использование модели объекта для прогнозирования состояний объекта, например, предсказание возможных аварийных ситуаций.

5. Работа модели в автоматическом режиме в «реальном» времени.

6. Использование модели для оптимального размещения точек измерения параметров на объектах.

7. Какие характеристики состояния объекта и как представляются моделью при работе в составе мониторинга.

Литературный обзор

Обзор литературы проводился согласно выше перечисленным требованиям к предполагаемой системе мониторинга состояния (см. табл. 1).

Таблица 1. Перечень и основные характеристики рассматриваемых систем мониторинга состояния с CFD-моделями

№	Назначение мониторинга	Ссылка	Наличие блока идентификации параметров модели	Возможность прогнозирования состояния объекта
1	Прогнозирование погоды УКМЕТ	[4]	Блок 4D-Var	Есть
2	Мониторинг повреждаемости оборудования АЭС	[5]	Есть	Не указано
3	Деформационное поведение зданий и сооружений	[6]	Есть	Не указано
4	Радиационная обстановка	[7]	Нет	Нет
5	Мониторинг окружающей среды	[8]	Не указано	Не указано
6	Состояния строительных конструкций машзала энергоблока АЭС	[9]	Не указано	Есть

Пример системы мониторинга параметров приведен в работе [3]. Основная задача системы – контроль радиационной безопасности объекта и анализ парамет-

ров объекта, характеризующих радиационную безопасность эксплуатации АЭС посредством сбора, обработки и представления информации о радиационной обста-

новке на АЭС и окружающей территории, состоянии технологических контуров и систем, дозах облучения персонала и отдельных лиц из числа населения.

По данным, изложенным в табл. 1, можно сделать следующие выводы: приведенные системы мониторинга разрабатываются под конкретные требования, предъявляемые к каждому объекту и параметрам, которые его характеризуют и должны быть контролируемы. Из-за этой специфики невозможно найти две похожие системы мониторинга параметров или же найти подобную той, которую предлагают авторы. Авторы [4] основной задачей видят уменьшение отставания времени счета от реального модели без потери точности, что особо важно для прогнозирования погоды. В работах [5,7-8] не указано, каким образом для настройки модели и прогнозов состояния объекта используются полученные при мониторинге результаты измерений. Авторами [6] упоминается о возникающих сложностях при отставании времени счета модели от реального времени, особенно при необходимости параметров модели объекта. Вопрос о необходимости идентификации параметров модели в работе [9] не отражен, в то время, как авторы [10] говорят о такой необходимости, как необходимости постоянной калибровки модели.

Нерешенные ранее проблемы

Приведенные выше примеры систем мониторинга предназначены в основном для сбора и контроля текущей информации о состоянии объектов и информировании людей о возможности каких-либо отклонений в текущий момент. Мы предлагаем расширить возможности систем мониторинга состояния за счет получения более точных результатов в виде полей значений параметров в максимально короткие промежутки времени с

возможностью выдачи сообщений о возможных аварийных ситуациях или достижении граничных значений параметров оператору для принятия решений. Для получения полей значений температур, скоростей, давлений, радиационных параметров и др. необходимы трехмерные модели термогазодинамического, влажностного и радиационного состояния НБК и ОУ (как CFD-модели, так и точные аналитические или многоузловые).

Постановка задачи

Задачей является анализ существующих систем мониторинга состояния различных объектов с применением CFD-моделей, обоснование необходимости CFD-моделей в системе мониторинга и выработка требований и необходимых составляющих предлагаемой системы мониторинга состояния НБК, что позволит решать задачи, приведены на рис. 2.

CFD-модели, решение которых основано на системах Навье-Стокса, позволяют получать подробные поля температур, влажностей, скоростей, концентраций радиоактивных аэрозолей в основном объеме НБК и ОУ для более детального контроля, прогнозирования и разработке решений по уменьшению влияния РА на работающий персонал и окружающую среду. Следует отметить, что, хотя CFD-модели уже применяются в мировой практике в системах мониторинга [5,8], расчеты уровня концентраций радиоактивных аэрозолей (РА) проводятся в упрощенных постановках (например, не учитывается оседание пыли), а также отсутствует опыт моделирования таких масштабных объектов как ОУ и НБК. В данной работе CFD-модели разрабатываются в широко известной в мире компьютерной программе ANSYS FLUENT, которая имеет международный сертификат качества ISO 9001.



Рис. 2. Система мониторинга состояния Нового Безопасного Конфайнмента и Объекта Укрытие.

Основная часть

Разработанная авторами CFD-модель учитывает практически все основные физические процессы, кото-

рые происходят внутри НБК, а также при его взаимодействии с окружающей средой. Тепловлажностный и радиационный режим основного объема НБК формиру-

ется за счет:

- радиационно-конвективного взаимодействия поверхностей (оболочек) с внешней средой;
- проникновения воздуха из окружающей среды через не плотности и щели в конструкциях;
- потоков теплоты и массы в основной объем;
- источников внутреннего тепловыделения (осветительные приборы, ОУ, электрооборудование) в основном объеме;
- нагнетание и удаления воздуха в основном объеме НБК системой принудительной вентиляции;
- перенос теплоты из и в объем НБК от поверхности почвы и фундамента, на которых расположен НБК.
- конденсация влаги на холодных поверхностях строений.

Учитывается также обтекание ветром и влияние солнечной радиации на НБК, вызывающее появление разницы давлений и температуры внутри и снаружи ОУ и НБК, что приводит к возникающим утечкам воздуха и радиоактивных аэрозолей через крышу, а также появлению конвективных потоков воздуха внутри ОУ, что в свою очередь, приводит к выбросам и распространению аэрозолей.

Анализ движения радиоактивной пыли в основном

объеме НБК и возможных выбросов в окружающую среду через щели между вертикальными стенами НБК и зданиями ОУ особенно важен во время демонтажа конструкций и обращения с радиоактивными отходами.

Между всеми твердыми поверхностями НБК, ОУ, поверхностью земли и воздухом, который обтекает эти поверхности, задавались условия сопряженного теплообмена. На внешней оболочке НБК задавались граничные условия в виде условий радиационно-конвективного теплообмена и условий массообмена воздуха, который слабо фильтруется через крышу и стены НБК, и перенос влажности между поверхностями оболочки и внешней средой вследствие перепада давления, который определяется направлением и силой ветра, обтекающим НБК. Воздухо- и влагообмен между основным объемом и окружающей средой осуществляется с помощью системы вентиляции и протечек воздуха и влаги из окружающей среды через щели между вертикальными стенами НБК и строительными конструкциями ОУ. Учитывалось также влияние фундамента и Земли на глубину 15 м, где задавалось постоянное значение температуры 10 °С. Детально исходные данные, граничные условия и модель описаны в [11]. Предлагаемая в систему мониторинга CFD-модель, приведена на рис. 3.

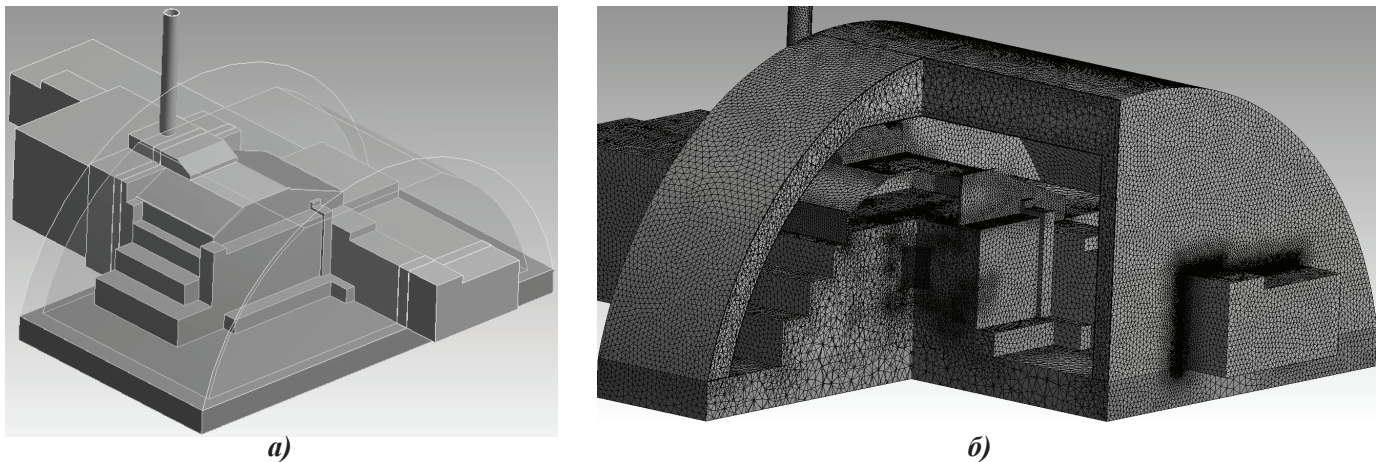


Рис. 3. Модели ОУ (а) и ОУ с НБК (б).

Работоспособность и достоверность компьютерной модели ОУ была проверена путем сопоставления результатов нестационарных расчетов и экспериментально измеренных значений температур, выбросов и концентраций РА внутри и вокруг ОУ (рис. 3, а). Типичные результаты полей температур и поле распространения РА из ОУ внутри НБК приведены на рис. 4.

Работоспособность модели ОУ подтвердилась также путем сравнения значений концентраций РА, выходящих из ОУ, с полученными с помощью независимой программы ARTM [12]. Удовлетворительное согласование выбросов РА из ОУ получено при сравнении результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными в Институте проблем безопасности АЭС НАНУ.

Верифицированная модель ОУ была введена в общую модель ОУ и НБК (рис. 3, б) для апробации ее

работоспособности при моделировании полей концентрации частиц РА с ОУ, выходящих в основной объем и окружающее пространство. На рис. 5 приведены изоповерхности концентраций радиоактивной пыли внутри и снаружи НБК, а также изолинии концентраций радиоактивной пыли в местах работы персонала в НБК. Изоповерхности и изолинии концентраций РА позволяют определить места внутри НБК с предельными значениями концентраций, что является важной возможностью разработанной модели при ее работе в составе мониторинга радиационной обстановки НБК (рис. 2).

В составе мониторинга необходимые параметры модели будет уточняться с помощью идентификации этих параметров по поступающим экспериментальным данным, т.о. модель будет самообучаться в процессе ее функционирования в системе мониторинга.

На сегодняшний день, детальные расчеты радиаци-

онных загрязнений в режиме нормальной эксплуатации и в случаях повышенных выбросов РА из ОУ и НБК не проводились, что может привести как к переоценке угрозы и употреблению слишком консервативных мер

безопасности, так и к ее недооценке, что связано с возможными последствиями для здоровья персонала, так и для окружающей среды. Обе эти ситуации ведут к чрезмерным затратам.

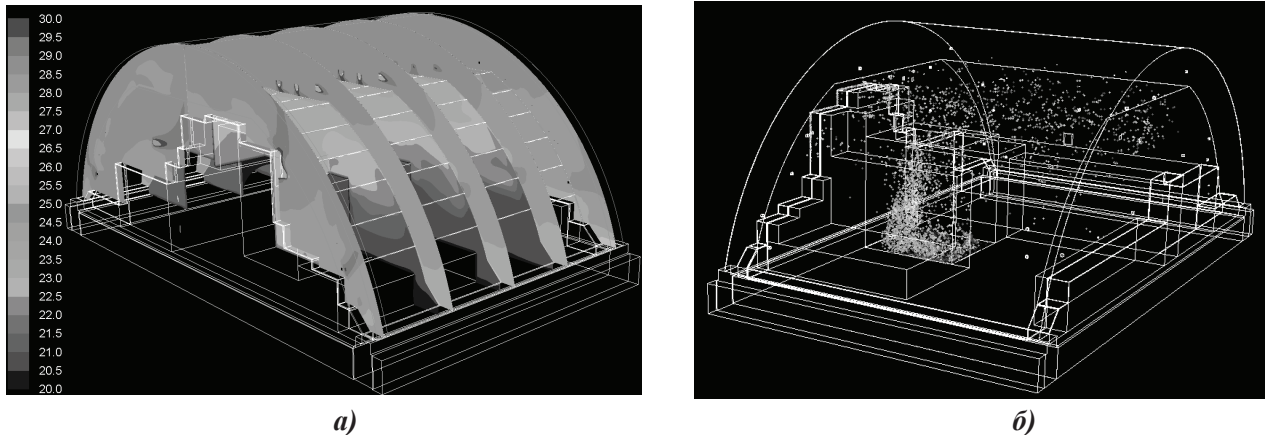


Рис. 4. Распределение температуры в кольцевом и основном объемах НБК (а) и картина выхода частиц РА из ОУ и их распространение в объеме НБК (б).

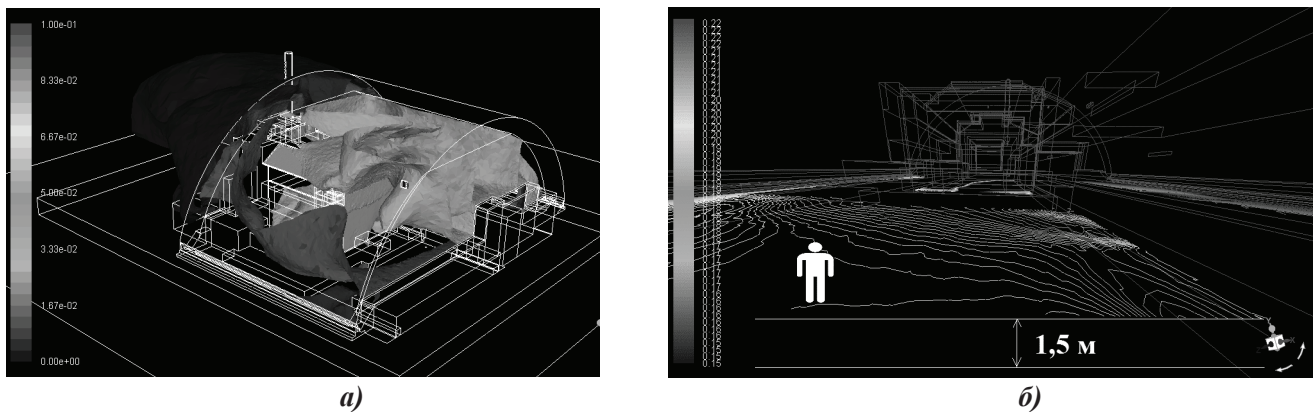


Рис. 5. Изоповерхности концентраций радиоактивной пыли внутри и снаружи НБК (а) и изолинии концентраций радиоактивной пыли в местах работы персонала в НБК (б), Бк/м³.

Выводы и перспективы

1. В статье изложены необходимость разработки и использования CFD-модели в системе мониторинга тепловлажностного и радиационного состояния НБК, как особо важного объекта, который должен обеспечить радиационную безопасность на ЧАЭС.

2. Обзор существующих систем мониторинга объектов с использованием CFD-моделей позволил сформулировать требования к предлагаемой системе мониторинга состояния НБК. Изложены особенности и проблемы применения модели в таком мониторинге.

3. Предложена схема мониторинга состояния НБК с использованием постоянно действующей трехмерной модели, что позволит усовершенствовать, дополнить и расширить возможности проектируемой системы мониторинга параметров НБК.

4. Разработана усовершенствованная CFD-модель радиационного состояния Нового Безопасного Конфайнмента и Объекта Укрытие и проведена ее верифи-

кация по данным измерений выбросов радиоактивных аэрозолей из ОУ. Модель опробована для решения задач анализа и прогнозирования распространения радиоактивных аэрозолей внутри и за пределы НБК.

В дальнейшем, предусматривается разработка методологии интеграции усовершенствованной CFD-модели в систему мониторинга радиационного состояния НБК и ОУ для анализа и прогнозирования текущего состояния НБК и ОУ как в режиме нормальной эксплуатации, так и в случаях чрезвычайных ситуаций, связанных с повышенными выбросами радиоактивных веществ.

Данная работа является продолжением ранее проведенных работ для концерна НОВАРКА. Материалы этой статьи публикуются в рамках выполнения проекта Ядерной программы НАН Украины «Вдосконалення системи моніторингу термогазодинамічного і радіаційного стану Нового Безпечного Конфайнмента та Об'єкта Укриття щодо їх впливу на персонал і довкілля» в 2016–2018 годах и проекта НАТО «Redefined Chernobyl Confinement

model – assisting Ukraine in managing the radioactive dust disturbances and leaks and protecting their workers» в 2015–2017 годах.

ЛИТЕРАТУРА

1. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B8%D0%BD%D0%B3>
2. Приложение для информации: Предложение подрядчика ПК-1 НБК по технической концепции ПК-1 НБК // <http://chnpp.gov.ua/images/stories/sip/rus/081204append.pdf>
3. *Развитие и оптимизация систем контроля атомных электростанций 0-62 с ВВЭР*: монография / В.И. Скалозубов, Д.В. Билей, Т.В. Габлая, и др.; под ред. В. И. Скалозубова; НАН Украины, Ин-т проблем безопасности АЭС. – Чернобыль (Киев, обл.): – Ин-т проблем безопасности АЭС, 2008. – 512 с.
4. <http://www.metoffice.gov.uk/research/modelling-systems/numerical-models>.
5. *Поваров В.П., Бакиров М.Б.* RU 2574578 Система многопараметрического непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости оборудования атомной электростанции // <http://www.findpatent.ru/patent/257/2574578.html>.
6. *Голотина Л.А., Цветков Р.В., Шардаков И.Н.* Использование программного средства «ANSYS» в автоматизированной системе мониторинга механического состояния зданий и сооружений // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2008. – Volume 4, Issue 2. – стр. 48–50.
7. Система мониторинга эксплуатационных данных АЭС (в части радиационного мониторинга объекта) // http://neolant.ru/projects/news_detail.php?ID=206.
8. *Deme S., Jánosy J.S., Láng E., Szabó I.C.* Radionuclide dispersion calculation in environmental radiation monitoring system of the Paks NPP // *KFKI Atomic Energy Research Institute, H-1525, Budapest, P.O. Box 49, Paks Nuclear Power Plant, H-7031, Paks, P.O. Box 71* // <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/36/097/36097682.pdf>.
9. Пояснительная записка системы мониторинга технического состояния строительных конструкций машинного зала энергоблока №1 Балаковской АЭС для оценки технического состояния и остаточного ресурса в период дополнительного срока эксплуатации // Пенза. – 2010. – 74 стр.
10. *Белостоцкий А.М., Каличава Д.К.* Математическое моделирование как основа мониторинга зданий и сооружений // *Int. Journ. for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2010. – Volume 6, Issue 1&2. – pp. 78–80.
11. *Круковський П.Г.* Аналіз термогазодинамічного стану Нового Безпечного Конфайнменту і «Об'єкта Укриття» // *Вісник Національної Академії України*, 2014, №3, с.13–19.
12. *Richter C., Sogalla M., Thielen H., Martens R.* Atmosphärisches Radionuklid-Transport-Modell mit der graphischen Benutzeroberfläche GO-ARTM, Programmbeschreibung zu Version 2.8.0 (GO-ARTM Version 2.0) // Stand 17.04.2015, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln.

USING THERMAL, HUMIDITY AND RADIATION CONDITION CFD-MODEL IN THE MONITORING SYSTEM OF THE NEW SAFE CONFINEMENT

Krukovskiy P.G., Tadhia O.Y., Deyneko A.I., Metel M.A.

Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, ul. Zhelyabova, 2a, Kiev-57, 03057, Ukraine

Review of existing monitoring systems employing the CFD-models allowed to put forward re-quirements to the proposed monitoring system of the potentially hazardous objects, such as NSC. It reveals features and problems of CFD-models application in such monitoring systems. The monitoring system of the NSC state with a permanently operating three-dimensional CFD-model will improve, complement and extend the capabilities of the designed monitoring system of NSC parameters. The article describes the relevance and advantages of the developed CFD-model over other models. The necessity of using the CFD-model in the monitoring system of the NSC's thermal, humidity, and radiation state is shown. The advanced CFD-model of radiation state of the NSC and the Object Shelter was developed and its verification by measurements of emissions of radioactive aerosols from the Shelter was conducted. The model was tested for solving the problems of the analysis and forecasting the spread of radioactive aerosols inside and their leaks outside the NSC.

References 12, table 1, figures 5.

Key words: New Safe Confinement, Shelter Object, radiation safety, state monitoring, CFD-model.

1. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B8%D0%BD%D0%B3>

2. *Prilozheniye dlya informatsii: Predlozheniya podryadchika PK-1 NBK po tekhnicheskoy kontseptsii PK-1 NBK* [Appendix for information: Proposals of the contractor NSC CS-1 on the technical concept of NSC CS-1], <http://chnpp.gov.ua/images/stories/sip/rus/081204append.pdf> (RUS)

3. *Razvitiye i optimizatsiya sistem kontrolya atomnykh elektrostantsiy 0-62 s VVER: monografiya* [The development and optimization of nuclear power plant control systems with 0-62 PWR: Monograph] . V.I. Skalozubov, D.V. Biley, T.V. Gablaya, i dr.; pod red. V. I. Skalozubova; NAN Ukrainy, In-t problem bezopasnosti AES [Institute of safety problem NASU], Chernobyl', 2008, 512 p. (RUS)

4. <http://www.metoffice.gov.uk/research/modelling-systems/numerical-models>.

5. *Povarov V.P., Bakirov M.B. RU 2574578 Sistema mnogoparametricheskogo nepreryvnogo monitoringa ekspluatatsionnoy povrezhdayemosti oborudovaniya*

atomnoy elektrostantsii [Multiparameter system of continuous monitoring of damage to operational nuclear power plant equipment], <http://www.findpatent.ru/patent/257/2574578.html>. (RUS)

6. *Golotina L.A., Tsvetkov R.V., Shardakov I.N. Ispol'zovaniye programmnoy sredstva «ANSYS» v avtomatizirovannoy sisteme monitoringa mekhanicheskogo sostoyaniya zdaniy i sooruzheniy* [Using the software tool «ANSYS» in the automated system for monitoring the mechanical state of buildings and structures], *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2008, V. 4, Issue 2, P. 48–50. (RUS)

7. *Sistema monitoringa ekspluatatsionnykh dannykh AES (v chasti radiatsionnogo monitoringa ob"yekta)* [NPP operational data monitoring system (in terms of radiation monitoring facility)], http://neolant.ru/projects/news_detail.php?ID=206. (RUS)

8. *Deme S., Jánosy J.S., Láng E., Szabó I.C. Radionuclide dispersion calculation in environmental radiation monitoring system of the Paks NPP. KFKI Atomic Energy Research Institute, H-1525, Budapest, P.O. Box 49, Paks Nuclear Power Plant, H-7031, Paks, P.O. Box 71, <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/36/097/36097682.pdf>.*

9. *Poyasnitel'naya zapiska sistemy monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya stroitel'nykh konstruksiy mashinnogo zala energobloka №1 Balakovskoy AES dlya otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya i ostatochnogo resursa v period dopolnitel'nogo sroka ekspluatatsii* [The explanatory note of the system for monitoring the technical condition of building constructions machine room unit №1 of Balakovo NPP to assess the technical condition and remaining life during the additional years of operation], Penza, 2010, 74 p. (RUS)

10. *Belostotskiy A.M., Kalichava D.K. Matematicheskoye modelirovaniye kak osnova monitoringa zdaniy i sooruzheniy* [Mathematical modeling as a basis for buildings and structures monitoring]. *Int. Journ. for Computational Civil and Structural Engineering*, 2010, V. 6, Issue 1&2, pp. 78–80. (RUS)

11. *Krukovskiy P.G. Analiz termogazodinamichnogo stanu Novogo Bezpechnogo Konfaynmentu í «Ob'ekta Ukrityta»* [Analysis heat and humid state of New Safe Confinement and "Shelter" Object], *Vísnik Natsional'noí Akademii Ukraini* [Bulletin of the National Academy of Ukraine], 2014, №3, pp.13–19. (UKR)

12. *Richter C., Sogalla M., Thielen H., Martens R. Atmosphärisches Radionuklid-Transport-Modell mit der graphischen Benutzeroberfläche GO-ARTM, Programmbeschreibung zu Version 2.8.0 (GO-ARTM Version 2.0), Stand 17.04.2015, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln.*

Получено 10.01.2016

Received 10.01.2016