

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ ВНУТРИ РАДИАЦИОННО-ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ

В. Г. Батий, В. В. Егоров, Ю. И. Рубежанский

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль

Решена нестационарная задача воздушного распространения аэрозолей во внутренних помещениях объекта с радиационно-опасными технологиями. Вычисления проводились на основе уточненных расчетных методик. В качестве примера приведены результаты расчетов распространения аэрозолей при возможной аварии, связанной с падением и разгерметизацией отработавшей тепловыделяющей сборки в процессе ее загрузки в контейнер с целью транспортирования в хранилище. Полученные результаты могут найти применение на действующих объектах атомной энергетики.

Введение

После аварии 1986 г. на 4-м энергоблоке ЧАЭС возникло понимание того, что безопасность должна базироваться не только на инструкциях, но и на технических средствах, на внутренних свойствах технологического процесса, в которые безопасность встраивалась бы изначально.

Что касается радиационно-опасных производств, то речь идет о технических средствах управления протеканием аварии с целью минимизации ее негативных последствий, т.е. о технических средствах управления радиационными рисками.

Попадание радиоактивных веществ в атмосферу может быть связано как с постоянными выбросами при нормальной эксплуатации оборудования, так и с залповыми выбросами в случае возможных аварий.

Воздушное распространение радиоактивных веществ во внутренних помещениях происходит достаточно быстро: от нескольких секунд для небольших и средних помещений, до нескольких десятков секунд для больших помещений типа нового безопасного конфинмента (НБК).

Таким образом, для эффективного управления радиационными рисками на радиационно-опасных объектах необходимо точно сформулировать критерии и требования к системам управления процессом распространения радиоактивных веществ с помощью, например, закрытия-открытия изолирующих перегородок (для НБК – жалюзи, ворота и др.), включения-выключения различных вытяжных устройств с целью перенаправления воздушных потоков. Такое управление может осуществляться только с помощью технических средств (автоматизированной системы управления) – оператор не успеет адекватно среагировать на аварию.

При разработке такой системы управления одной из ключевых является проблема разработки достаточно точной математической модели воздушного распространения радиоактивных аэрозолей во внутренних помещениях объекта.

В настоящей работе разработана такая модель, а также проведено математическое моделирование процесса распространения аэрозолей при возможной аварии, связанной с падением и разгерметизацией отработавшей тепловыделяющей сборки (ОТВС) в процессе ее загрузки в контейнер с целью транспортирования в хранилище.

Математическая модель распространения радиоактивных аэрозолей внутри радиационно-опасных объектов

Рассматривается распространение облака мелкодисперсной пыли во внутренних помещениях объекта. Облако могло образоваться, например, в результате аварии (падение груза, обрушение строительных конструкций, пожар и пр.).

В основу модели положены следующие общие допущения. Рассматривается турбулентное движение многокомпонентной смеси – вязкого сжимаемого нагреваемого газа. При этом предполагается, что газ совершенен и представляет собой изотропную «ньютоновскую» среду. Наличие аэрозолей не влияет на реологические и термодинамические параметры газа. Химические реакции не учитываются.

Аналогично тому, как это было сделано в работе [1], модель включает в себя следующие уравнения. Движение воздуха в рассматриваемом случае описывается системой уравнений Навье - Стокса. К этим уравнениям присоединяется еще уравнение непрерывности, уравнение баланса энергии в движущемся газе, а также уравнения массопереноса. Движение воздушного потока во внутренних помещениях объекта является практически всегда турбулентным. При расчетах использовалась k - ϵ модель турбулентности [3]. Коэффициент эффективной вязкости вычисляется как сумма молекулярного и турбулентного коэффициентов, при этом последний вычисляется как функция параметров турбулентности – кинетической энергии и скорости ее диссипации. Для их нахождения требуется решить еще два дополнительных уравнения: уравнение турбулентной кинетической энергии и уравнение скорости диссипации.

Обычно при воздушном распространении аэрозолей во внутренних помещениях давление p не очень велико и температура T не слишком низкая, поэтому в качестве уравнения состояния можно использовать уравнение состояния для идеальных в термодинамическом смысле газов. В этом случае плотность потока ρ определяется с учетом удельной (относительной) концентрации $Y_i \geq 0$ каждого аэрозоля следующим образом:

$$\rho = \frac{p}{RT \sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{m_i}},$$

где R – универсальная газовая постоянная; m_i – молярная масса i -й примеси; n – общее число рассматриваемых примесей, $\sum_{i=1}^n Y_i = 1$.

Остальные параметры потока (вязкость, теплопроводность, теплоемкость) вычисляются как линейная комбинация соответствующих параметров:

$$\mu = \sum_{i=1}^n Y_i \mu_i, \quad \lambda = \sum_{i=1}^n Y_i \lambda_i, \quad c_p = \sum_{i=1}^n Y_i c_{p_i}.$$

Зависимость вязкости и теплопроводности от температуры для каждого аэрозоля задаются по формулам Сюзерленда (Sutherland) [2]

$$\mu_i = \mu_{iN} \left(\frac{T}{C_{i1}^\mu} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{C_{i1}^\mu + C_{i2}^\mu}{T + C_{i2}^\mu}, \quad \lambda_i = \lambda_{iN} \left(\frac{T}{C_{i1}^\lambda} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{C_{i1}^\lambda + C_{i2}^\lambda}{T + C_{i2}^\lambda}.$$

Здесь μ_{iN}, λ_{iN} – номинальные значения вязкости и теплопроводности; C_{i1}^μ, C_{i2}^μ и $C_{i1}^\lambda, C_{i2}^\lambda$ – первый и второй коэффициенты вязкости и теплопроводности соответственно. Следует отметить, что C_{i1}^μ и C_{i1}^λ – суть абсолютная температура, при которой $\mu_i = \mu_{iN}$ и $\lambda_i = \lambda_{iN}$ соответственно.

В качестве граничных условий задаются условия прилипания частиц жидкости к ограничивающим стенкам. На некоторой части границы могут задаваться скорости, избыточное давление, температура воздушного потока, объемные концентрации примесей.

В качестве начальных условий задаются функции вектора скоростей, температуры, давления потока, а также распределение объемных концентраций аэрозолей.

Решение задачи разделялось на несколько этапов.

На первом этапе решалась задача об обтекании здания объекта ветровым потоком, рассчитывались поля скоростей, температур и давлений. При этом в невозмущенной атмосфере изменение температуры с высотой задавалось по линейному закону, давление – по барометрической формуле, а горизонтальная составляющая скорости ветра изменялась по степенному закону.

На втором этапе решалась задача о движении воздушного потока во внутренних помещениях объекта, при этом в качестве граничных условий на открытых проемах принимались значения, найденные на первом этапе.

На третьем этапе в результате аварии происходит выброс радиоактивных аэрозолей во внутренние помещения объекта. Задаются начальные условия для массовых долей аэрозолей.

На четвертом этапе после прекращения выброса радиоактивных аэрозолей решается задача их переноса воздушным потоком во внутренних помещениях объекта.

Загрязнение помещений объекта происходит в результате оседания аэрозольных частиц в воздухе под действием силы тяжести. Плотность потока примеси у горизонтальной поверхности \dot{A}_s (Бк/(м²с)) определяется как

$$\dot{A}_s = w_{sed} A_v,$$

где A_v – приповерхностная объемная активность примеси, Бк/м³; w_{sed} – скорость седиментации, т. е. скорость установившегося оседания аэрозольных частиц в воздухе под действием силы тяжести, м/с.

Общее количество активности Q , осевшей на поверхность Ω за период времени T равно

$$Q = \int_{\Omega_0}^T \int \dot{A}_s(x,t) d\Omega dt.$$

Скорость седиментации для аэрозольных частиц с радиусами меньше 10 мкм определяется следующим образом [4]:

$$w_{sed} = \frac{2r^2 g (\rho - \rho_{air})}{\eta_{air}} \cdot \left(1 + 1.246 \cdot \frac{\lambda_{air}}{r} + 0.42 \cdot \frac{\lambda_{air}}{r} \cdot \exp\left(-0.87 \cdot \frac{r}{\lambda_{air}}\right) \right).$$

Здесь r – радиус частицы; g – ускорение силы тяжести; ρ – плотность частицы; ρ_{air} – плотность воздуха; η_{air} – динамическая вязкость воздуха; λ_{air} – средняя длина свободного пробега молекул воздуха.

Если радиус частиц больше 10 мкм, то скорость седиментации определяется выражением [5]

$$w_{sed} = \frac{\eta_{air} Re}{2r \rho_{air}},$$

где Re – число Рейнольдса.

Результаты вычислений

В качестве примера рассматривается задача о распространении радиоактивных аэрозолей при возможной аварии на АЭС, связанной с падением и разгерметизацией ОТВС в процессе ее загрузки в контейнер с целью транспортирования в хранилище. При этом используется упрощенная геометрическая модель расположения помещений.

Расчетная область задачи для первого этапа решения задачи показана на рис. 1. Здание для перегрузки представлено своим плоским сечением. Границы области образуют прямоугольник. Общий пространственный размер по горизонтальной оси расчетной области был равен 156 м, по вертикальной – 67 м.

На рис. 2. показана расчетная область задачи для последующих этапов решения задачи. Внутренние помещения представлены плоским сечением. Габаритные размеры 26×17 м. Слева и справа расположены откатные ворота (высотой 5 м). Вверху – проем для принудительной вентиляции (1,2 м).

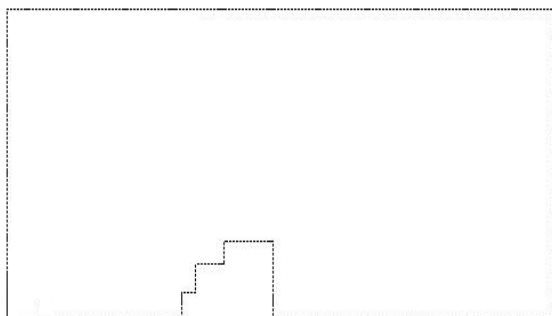


Рис. 1. Расчетная область задачи, этап 1.

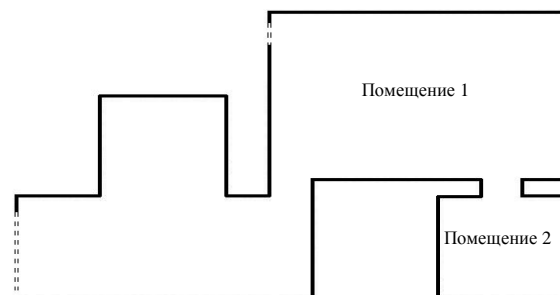


Рис. 2. Расчетная область задачи, этапы 2 – 5.

На рис. 3 и 4 показаны поля скоростей и избыточного давления, найденных в результате решения внешней задачи обтекания объекта [1].

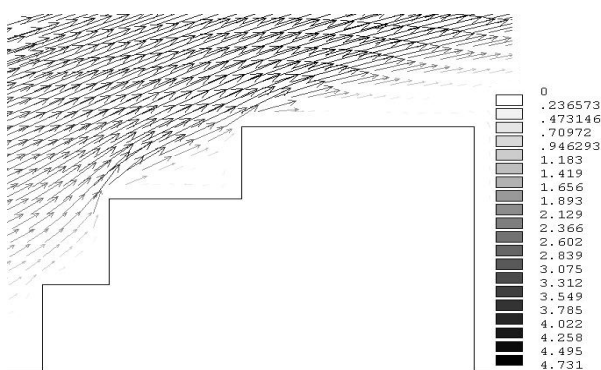


Рис. 3. Скорости ветрового потока, м/с (скорость ветра на высоте флюгера 3.3 м/с).



Рис. 4. Избыточное давление, Па.

Далее на рисунках показаны распределение избыточного давления (рис. 5 и 6) и скорости воздушного потока (рис. 7) по высоте входного и выходного проемов, найденных в результате решения задачи обтекания объекта.

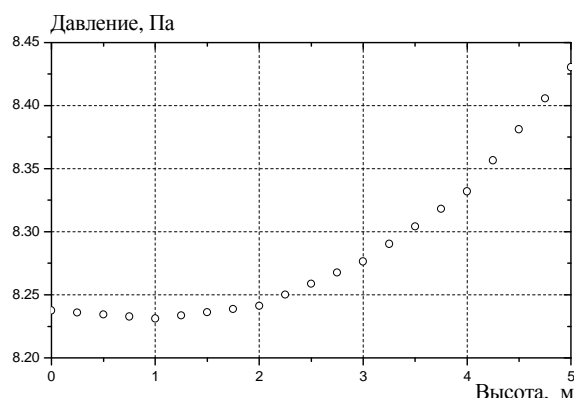


Рис. 5. Распределение избыточного давления по высоте входного проема.

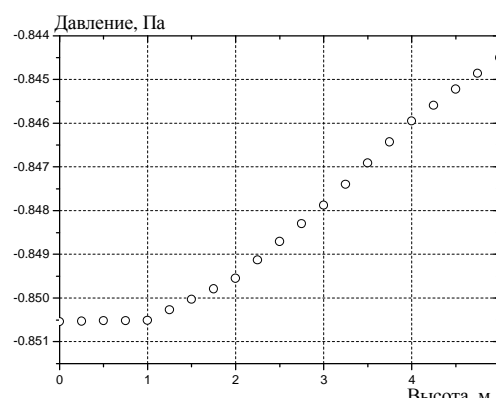


Рис. 6. Распределение избыточного давления по высоте выходного проема.

На рис. 8 приведены результаты расчетов на втором этапе решения задачи. Откатные ворота открыты, вытяжная вентиляция не работает.

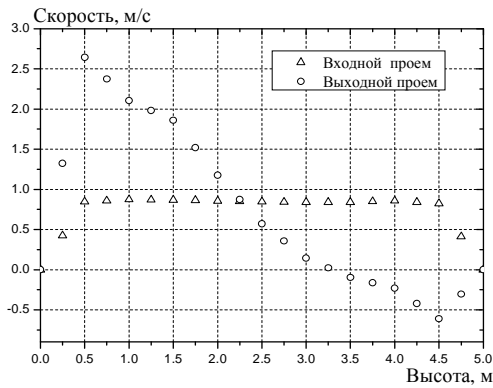


Рис. 7. Распределение скорости воздушного потока по высоте входного (выходного) проемов.

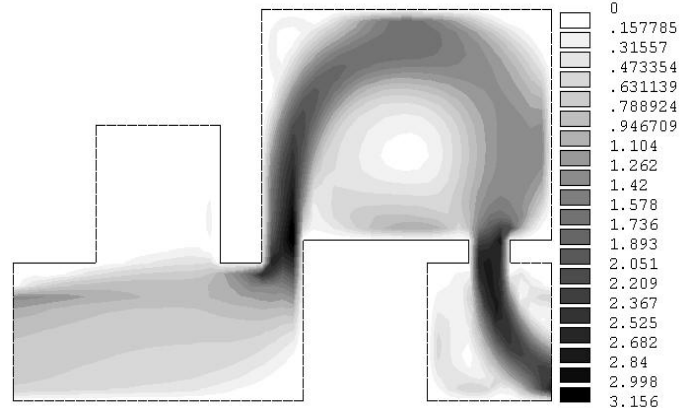


Рис. 8. Скорости движение воздушных потоков во внутренних помещениях до аварии, м/с.

Далее предполагается, что в результате некоторых событий при проведении погрузочно-разгрузочных работ произошло падение одной ОТВС с высоты 6 м, в результате которого произошла полная разгерметизация защитной оболочки и выход $4,2 \cdot 10^{12}$ Бк активности во внутренние помещения объекта (третий этап расчета). Скорость выхода консервативно принимается 10,8 м/с, время выхода – 1 с.

На рис. 9 приведены результаты расчетов скорости движения воздушных потоков в момент времени 1 с после падения ОТВС.

На рис. 10 – 16 приведено распределение относительной концентрации радиоактивных аэрозолей во внутренних помещениях объекта в определенные моменты времени, прошедшего после падения ОТВС.

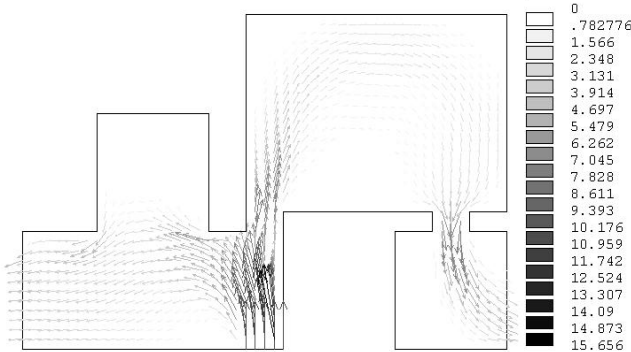


Рис. 9. Скорости движения воздушных потоков в момент времени 1 с после падения ОТВС, м/с.

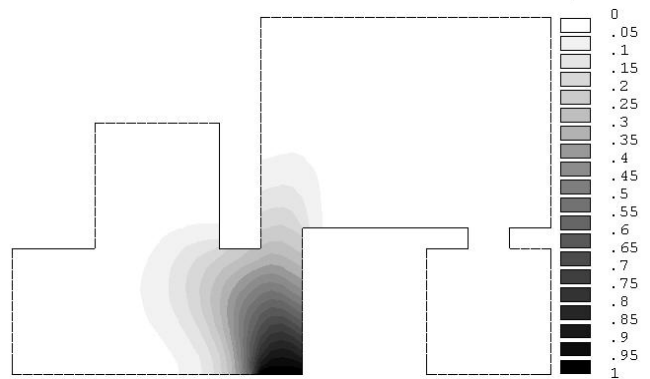


Рис. 10. Относительная концентрация (1 с).

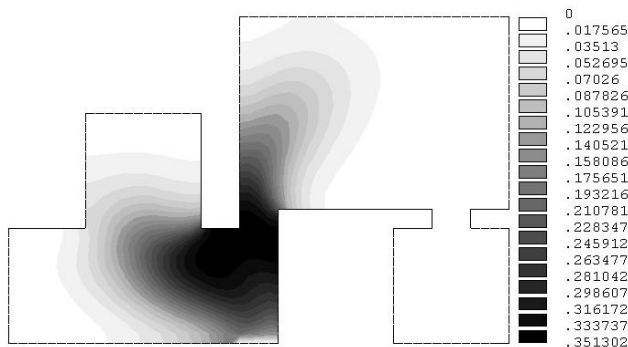


Рис. 11. Относительная концентрация (5 с).

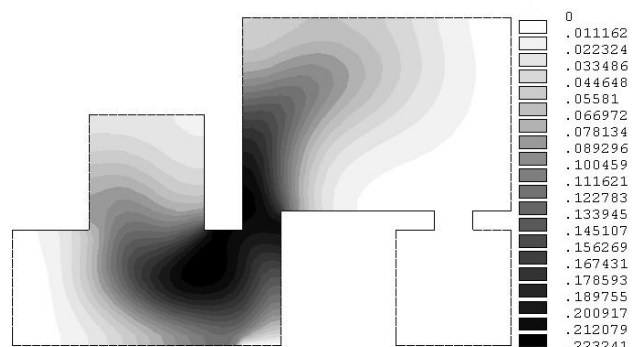


Рис. 12. Относительная концентрация (10 с).

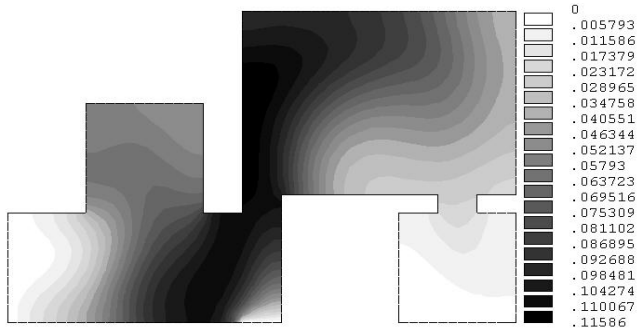


Рис. 13. Относительная концентрация (20 с).

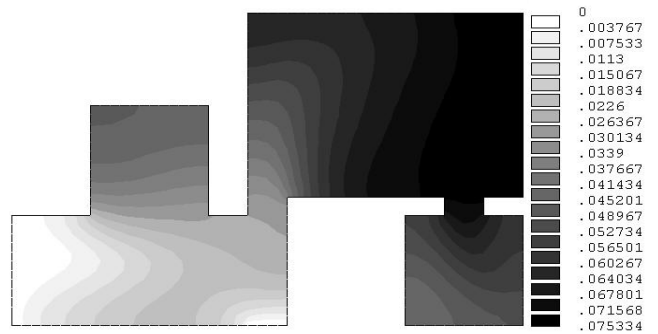


Рис. 14. Относительная концентрация (50 с).

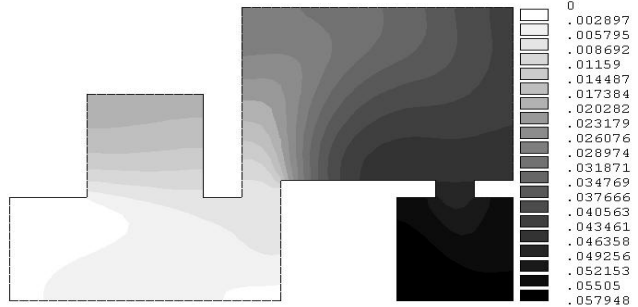


Рис. 15. Относительная концентрация (100 с).

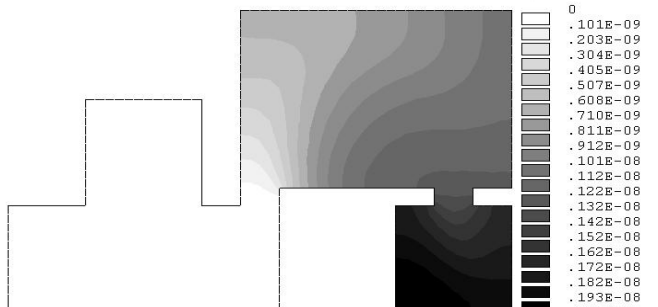


Рис. 16. Относительная концентрация (1000 с).

На рис. 17 – 19 показана интенсивность оседания радиоактивных аэрозолей на поверхность пола в помещениях 1 и 2 (см. рис. 2) в различные моменты времени после падения ОТВС.

Интенсивность оседания, Бк/м²·с

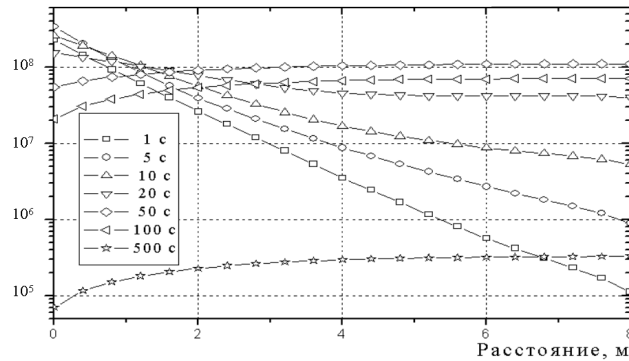


Рис. 17. Интенсивность оседания аэрозолей в помещении 1.

Интенсивность оседания, Бк/м²·с

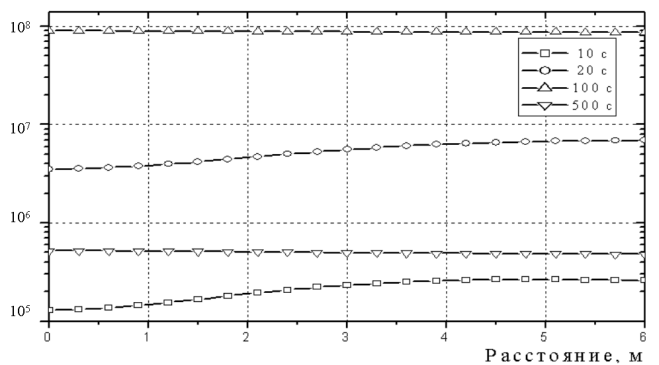


Рис. 18. Интенсивность оседания аэрозолей в помещении 2.

На рис. 20 показана средняя объемная активность в выходном проеме (высотой 5 м) в различные моменты времени после падения ОТВС.

Средняя интенсивность оседания, Бк/м²·с

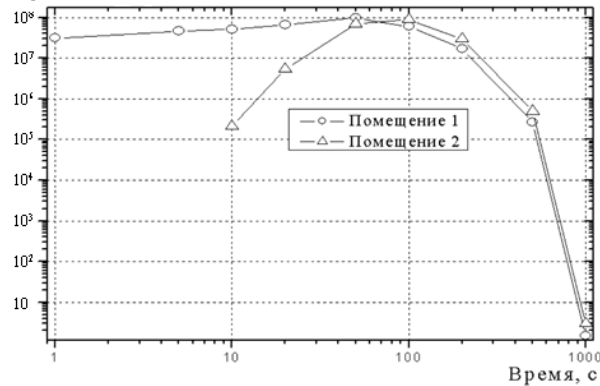


Рис. 19. Средняя интенсивность оседания аэрозолей.

Средняя объемная активность, Бк/м³

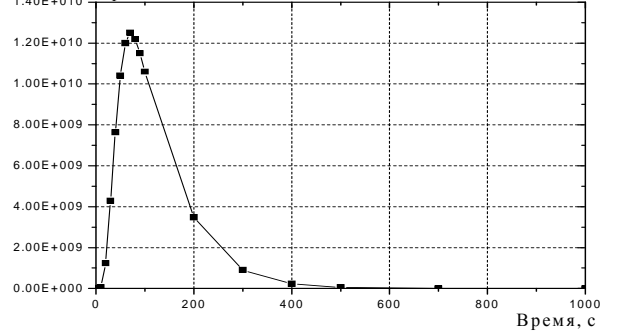


Рис. 20. Средняя объемная активность в выходном проеме.

Заключение

Проведенные расчеты показали, что принятая методика расчета достаточно полно описывает динамику распространения примесей во внутренних помещениях объекта с радиационно-опасными технологиями.

Методика является хорошей основой для оценки эффективности систем аварийной принудительной вентиляции и разработки системы управления протеканием аварии, позволяющую минимизировать радиационные воздействия на персонал, население и окружающую природную среду.

Полученные результаты могут найти применение на действующих объектах в процессе обращения с опасными ядерными, радиоактивными и химическими материалами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батий В. Г., Егоров В. В., Рубежанский Ю. И. Расчет концентрации радиоактивных аэрозолей вблизи объекта «Укрытие» на основе уточненных компьютерных моделей // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. - 2006. - Вип. 4. - С. 69 - 75.
2. White F. M. Viscous Fluid Flow, Second Edition, McGraw-Hill. - New York, 1991.
3. Launder B.E., Spalding, D.B. The Numerical Computation of Turbulent Flows // Computer Methods In Applied Mechanics and Engineering. – 1974. - Vol. 3. - P. 269 – 289.
4. Fuchs N. A., Sutugin A. G. Highly dispersed aerosols // Topics in Current Aerosol Research. - 1971. - Vol. 2. - P. 1 - 60.
5. Pruppacher H. R., Klett J. D. Microphysics of clouds and precipitation, D. Reidel, Norwell, Mass., 1980. - 714 p.

Поступила в редакцию 20.02.07

25 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РАДІОАКТИВНИХ АЕРОЗОЛІВ УСЕРЕДИНИ РАДІАЦІЙНО-НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

В. Г. Батій, В. В. Єгоров, Ю. І. Рубежанський

Вирішено нестационарну задачу повітряного розповсюдження аерозолів у внутрішніх приміщеннях об'єкта з радіаційно-небезпечними технологіями. Обчислення проводилися на основі уточнених розрахункових методик. Як приклад наведено результати розрахунків розповсюдження аерозолів при можливій аварії, пов'язаній з падінням і розгерметизацією відпрацьованої тепловиділяючої збірки в процесі її завантаження в контейнер з метою транспортування в сховище. Отримані результати можуть знайти застосування на діючих об'єктах атомної енергетики.

25 MATHEMATICAL MODELING OF INDOOR RADIOACTIVE AEROSOLS DISPERSION FOR RADIOACTIVE DANGER OBJECTS

V. G. Batiy, V. V. Yegorov, Yu. I. Rubezhanskiy

Non-stationary task of aerosol air dispersion inside premises of an object with radioactive danger technologies has been solved. Calculations were made on the basis of advanced calculation methods. As an example, calculation results of consequences of possible accident connected with drop and loss of pressure of a spent fuel assembly during its loading to container for transport to storage are given. Received results could be used on operating objects of nuclear energy industry.