

РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ ВБЛИЗИ ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ» НА ОСНОВЕ УТОЧНЕННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

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

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль

Решена нестационарная задача распространения радиоактивного выброса в атмосфере в непосредственной близости от объекта «Укрытие». Вычисления проводились на основе уточненных расчетных методик, разработанных для повышения радиационной безопасности в процессе преобразования объекта "Укрытие". Полученные результаты могут найти применение на действующих объектах атомной энергетики.

Введение

В процессе преобразования объекта "Укрытие" в экологически безопасную систему (при выполнении стабилизационных мероприятий, строительстве нового безопасного конфайнмента и пр.) есть вероятность обрушения внутренних нестабильных конструкций объекта. Это обрушение вызовет увеличение концентрации радиоактивной пыли во внутренних помещениях с последующим ее выносом в окружающую среду через отверстия в защитной оболочке объекта в результате естественной вентиляции [1, 2].

При выполнении работ по преобразованию объекта "Укрытие" в непосредственной близости от него одновременно может находиться большое число работающих и вынос радиоактивной пыли представляет для них определенную опасность. Наибольшее радиологическое воздействие при этом будет в том случае, если работающий окажется в области аэродинамической тени с подветренной стороны объекта, где концентрации выбрасываемой примеси в первые минуты после выброса могут достигать максимальных значений.

В настоящее время существует несколько приближенных методик расчета концентрации примеси в области аэродинамической тени здания. Наиболее совершенной из них является методика ОНД-86 [3]. Однако результаты, полученные на ее основе, следует интерпретировать как осредненные примерно за 20 – 30 мин значения мгновенной концентрации. Поэтому прогнозируемые величины доз, полученные персоналом за время, необходимое для того, чтобы покинуть опасную зону (5 – 10 мин), будут недостоверны, в частности они могут быть в несколько раз занижены.

Таким образом, особую актуальность приобретает проведение уточненной прогнозной оценки концентрации радиоактивной пыли в области аэродинамической тени здания объекта "Укрытие" в первые минуты после выброса.

В настоящей работе разработана методика расчета изменения со временем концентрации радионуклидов в аэродинамической тени радиационно-опасного объекта после аварийного выброса. Для отработки методики была создана упрощенная математическая модель объекта "Укрытие" и проведены расчеты распространения выбросов из объекта при направлении ветра "юг - север". Проведено также сравнение с результатами расчетов по ОНД-86.

Постановка задачи

Рассматривается распространение облака мелкодисперсной пыли в непосредственной близости от объекта "Укрытие". Облако могло образоваться, например, в результате аварии на объекте (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 пыли не влияет на реологические и термодинамические параметры газа. Химические реакции не учитываются.

Используемая модель переноса мелкодисперсной пыли включает в себя следующие уравнения. Движение воздуха в рассматриваемом случае описывается системой уравнений Навье - Стокса

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{V}) + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla})(\rho \vec{V}) = \rho \vec{g} - \vec{\nabla}(p + \mu_e \vec{\nabla} \cdot \vec{V}). \quad (1)$$

Здесь t – время; ρ – плотность; \vec{V} – вектор скоростей; \vec{g} – гравитационное ускорение; p – давление; μ_e – коэффициент эффективной вязкости.

К этим уравнениям присоединяются еще уравнение непрерывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0, \quad (2)$$

уравнение баланса энергии в движущемся газе

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \vec{\nabla} \cdot (\rho c_p T \vec{V}) = \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) + Q, \quad (3)$$

где T – температура; c_p – коэффициент теплоемкости; k – коэффициент теплопроводности; Q – мощность источников тепла; а также уравнения массопереноса

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho Y_i \vec{V}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho D_{mi} \vec{\nabla} Y_i) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

где Y_i – удельная (относительная) концентрация i -й примеси; $Y_i \geq 0$, $\sum_{i=1}^n Y_i = 1$.

При расчетах использовалась k - ε модель турбулентности в стандартной формулировке [4]. Коэффициент эффективной вязкости μ_e вычисляется как сумма молекулярного и турбулентного коэффициентов

$$\mu_e = \mu + \mu_t.$$

Коэффициент турбулентной вязкости μ_t вычисляется как функция параметров турбулентности – кинетической энергии k и скорости ее диссипации ε :

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (5)$$

где C_μ – заданная постоянная.

Для нахождения k и ε совместно с уравнениями (1) и (2) требуется решить еще два дополнительных уравнения.

Уравнение турбулентной кинетической энергии

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho k \vec{\nabla} \cdot \vec{V} = \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \vec{\nabla} k \right) + \mu_t \Phi - \rho \varepsilon \quad (6)$$

и уравнение скорости диссипации

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \varepsilon \vec{\nabla} \cdot \vec{V} = \vec{\nabla} \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \vec{\nabla} \varepsilon \right) + C_{1\varepsilon} \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \Phi - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (7)$$

Здесь Φ – тензор вязкой диссипации; σ_k , σ_ε , $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ – заданные постоянные.

Следует отметить, что плотность потока в уравнениях (1) – (7) определяется из уравнения состояния с учетом удельной концентрации каждой примеси. Остальные параметры потока (вязкость, теплопроводность, теплоемкость) вычисляются как линейная

комбинация от соответствующих параметров примесей. При этом значения параметров для каждой примеси задаются по формулам Саттерленда.

В качестве примера рассматривается плоская задача о распространении примеси в вертикальной плоскости. Расчетная область задачи показана на рис. 1. Объект "Укрытие" представлен своим плоским сечением (сечение "юг – север"). Влиянием ВТ-2 на движение воздушных потоков пренебрегаем. Границы области образуют прямоугольник. Общий пространственный размер по горизонтальной оси расчетной области был равен 1035 м, по вертикальной – 200 м.



Рис. 1. Расчетная область задачи.

В основу расчетов положено численное решение приведенных выше уравнений с помощью метода конечных разностей. Решение задачи разделялось на три этапа, на каждом из которых использовались свои граничные и начальные условия.

На первом этапе решается задача обтекания объекта "Укрытие" ветровым потоком, рассчитываются поля скоростей, температур и давлений для одного газа, воздуха без примеси при следующих граничных условиях. На поверхности земли и на стенах объекта задаются условия прилипания: $\vec{V} = 0$. На правой и верхней границах области (см. рис. 1) задается условие сопряжения с внешней средой: избыточное давление $P_{ref} = 0$. На левой границе области задается распределение горизонтальной составляющей скорости ветра с высотой

$$v_x = v_x^{(10)} \left(\frac{y}{10} \right)^s,$$

где $v_x^{(10)}$ – скорость ветра на высоте флюгера (10 м); y – высота над уровнем земли; s – показатель, зависящий от устойчивости атмосферы.

При расчетах принималось $s = 0,15$, что соответствует категории D устойчивости атмосферы по Пасквиллу, $v_x^{(10)} = 3.3$ м/с – среднегодовое значение скорости ветра в районе ЧАЭС.

В области также задавались начальные значения температуры и давления. Изменение температуры с высотой задавалось по линейному закону, а давление – по барометрической формуле

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{g y}{R_B T}\right),$$

где $R_B = R/M$, R – универсальная газовая постоянная; M – молекулярная масса; p_0 – давление на уровне земли.

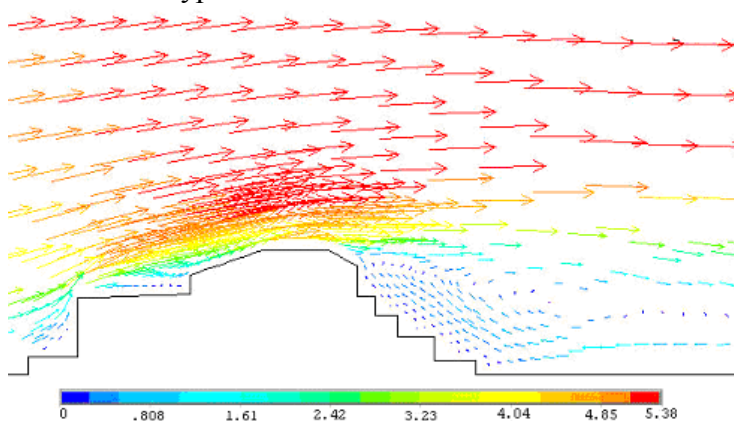


Рис. 2. Поле скоростей (м/с).

На рис. 2 показано поле скоростей, найденное в результате решения задачи обтекания объекта "Укрытие".

Поля скоростей, температуры, давления, найденные на первом этапе, используются в качестве начальных значений при последующем решении задачи.

На втором этапе происходит выброс. Источник выброса расположен в районе северных щитов-ключек (рис. 3). За 1 с выбрасывается 1 Бк

радиоактивной пыли со скоростью 1 м/с. Задача решается уже с учетом примесей. Задаются начальные условия для массовых долей примесей и температур. Этап разбивался по времени на 10 шагов с разными граничными условиями на выбрасываемые примеси.

На третьем этапе после прекращения выброса радиоактивной пыли решается задача ее переноса ветровым потоком. Результаты расчетов приведены на рис. 3 - 8.

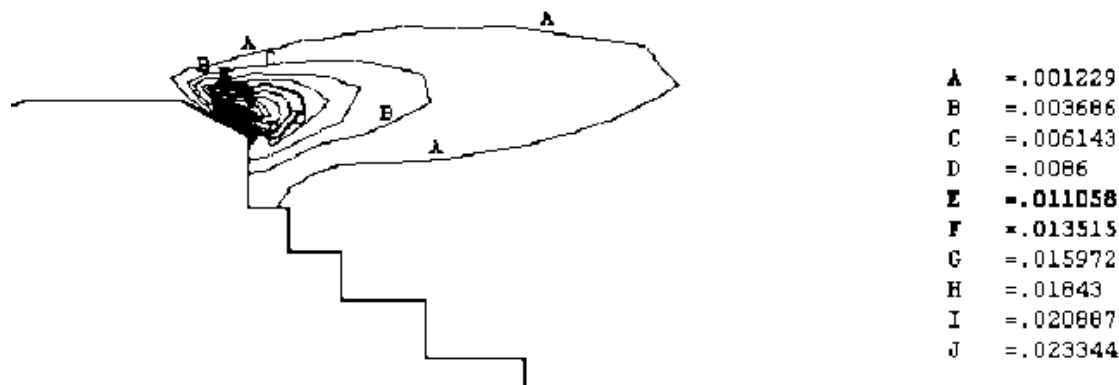


Рис. 3. Распределение объемной активности (Бк/м³) в конце первой минуты после прекращения выброса.

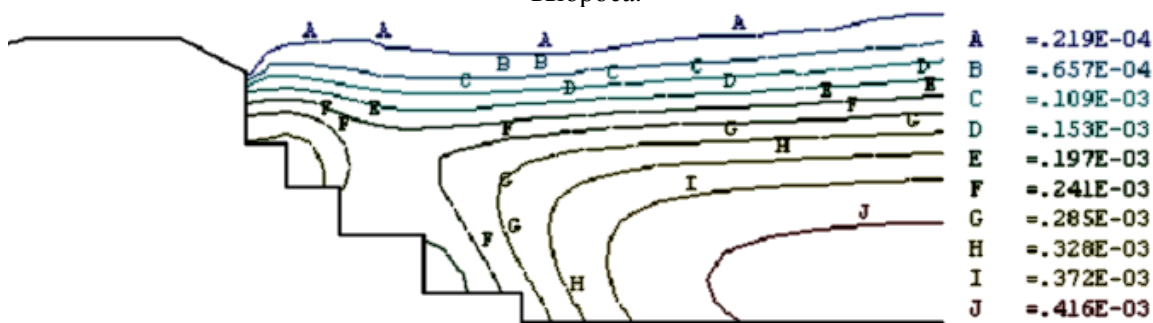


Рис. 4. Распределение объемной активности (Бк/м³) – 5 мин после прекращения выброса.

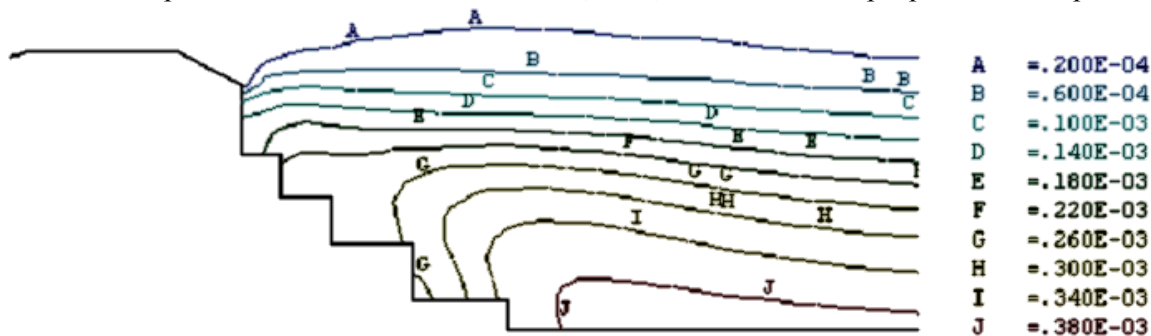


Рис. 5. Распределение объемной активности (Бк/м³) – 6 мин после прекращения выброса.

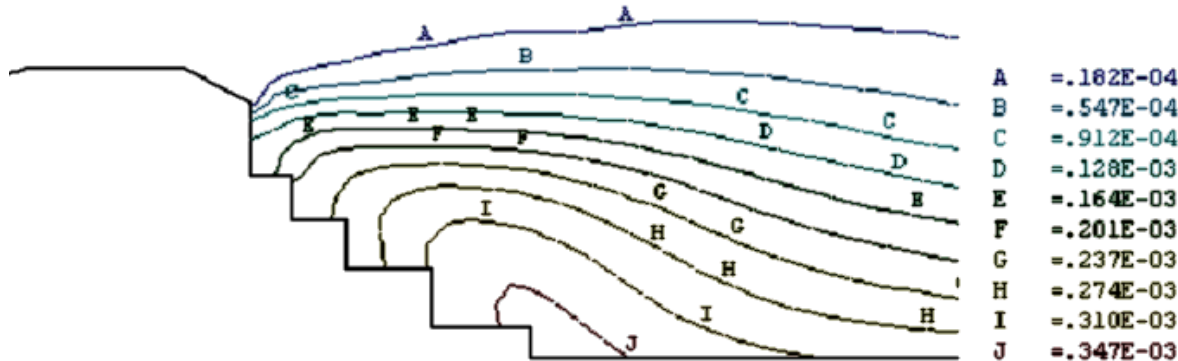


Рис. 6. Распределение объемной активности (Бк/м³) – 7 мин после прекращения выброса.

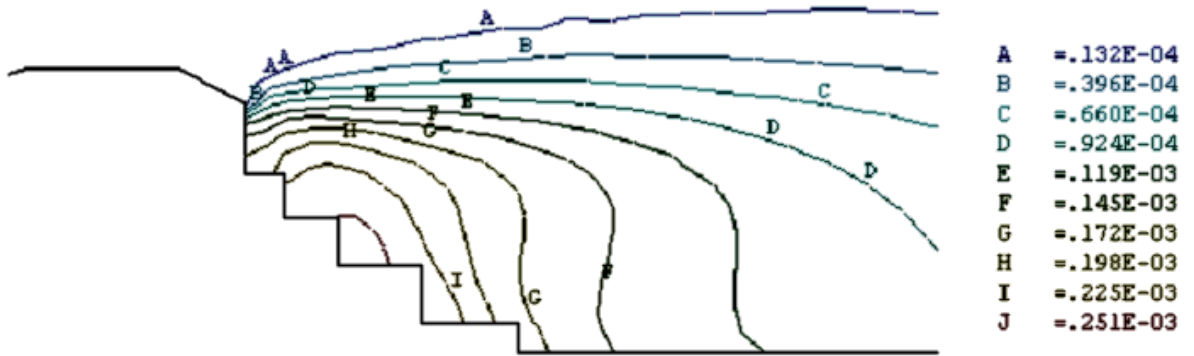


Рис. 7. Распределение объемной активности (Бк/м³) – 10 мин после прекращения выброса.

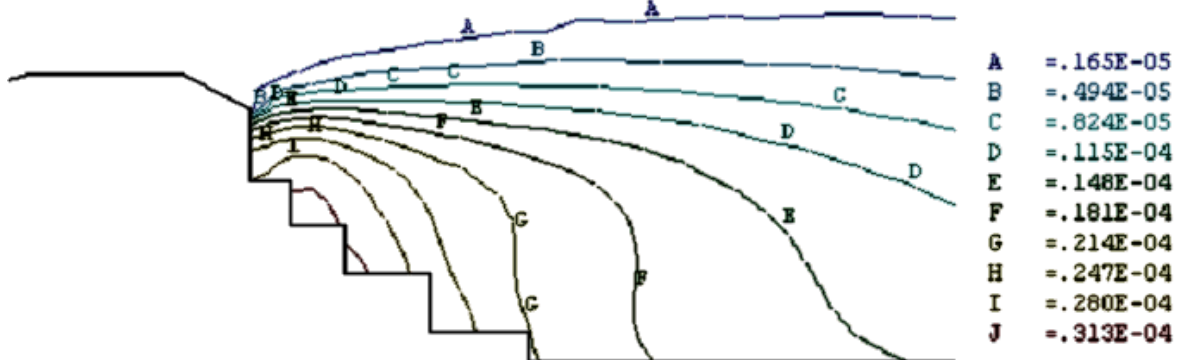


Рис. 8. Распределение объемной активности (Бк/м³) – 20 мин после прекращения выброса.

На рис. 9 приведена зависимость объемной активности (мкБк/м³) от расстояния от объекта на поверхности земли в различные моменты времени. На этом же рисунке приведены результаты расчетов по методике ОНД-86 (штрихпунктирная линия). Как видно из рисунка, результаты по ОНД-86 в данном случае расположены между значениями активности осредненными за 8 и 20 мин.

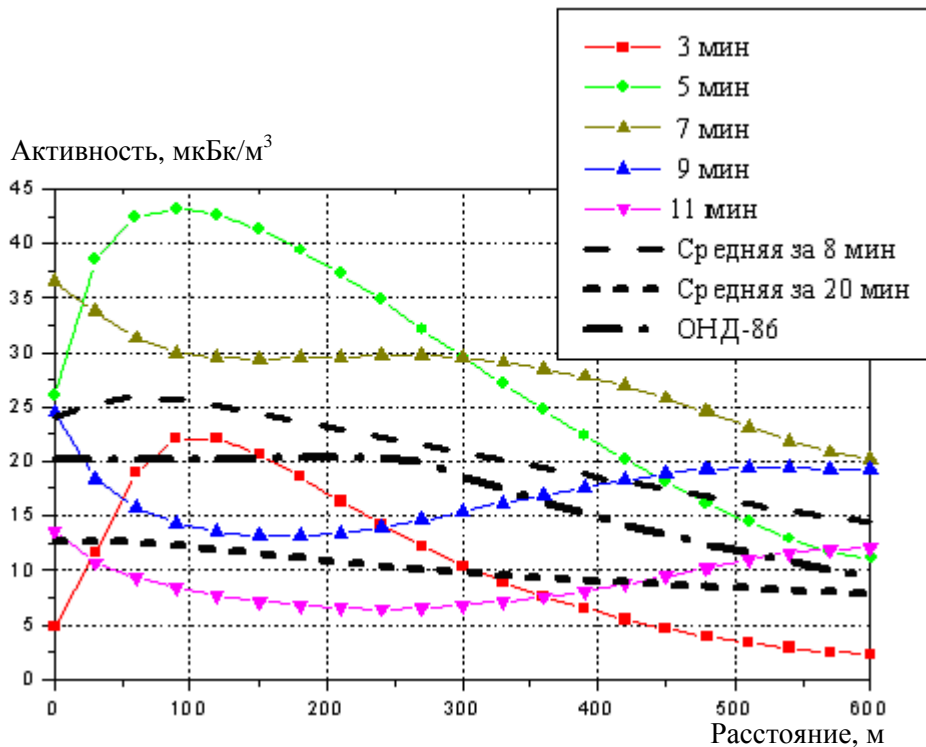


Рис. 9. Распределение объемной активности (мкБк/м³) на поверхности земли в зависимости от расстояния от объекта "Укрытие".

На рис. 10 приведена зависимость объемной активности (Бк/м³) на каскадах каскадной стены и на поверхности земли в зависимости от времени, прошедшего после окончания

выброса. Результаты приведены для характерных точек, в которых наблюдалось максимальное значение активности на соответствующих каскадах и поверхности земли.

Методика ОНД-86 в этом случае на всех каскадах дает значение около 20 мкБк/м^3 (см. рис. 9). Как видно из рисунка, значения объемной активности, полученные по более точной модели, составят: на поверхности земли $37 - 43 \text{ мкБк/м}^3$ (в промежутке времени между 4-й и 6-й минутами), а на четвертом, самом высоком каскаде – около 185 мкБк/м^3 (в промежутке между 1-й и 3-й минутами).

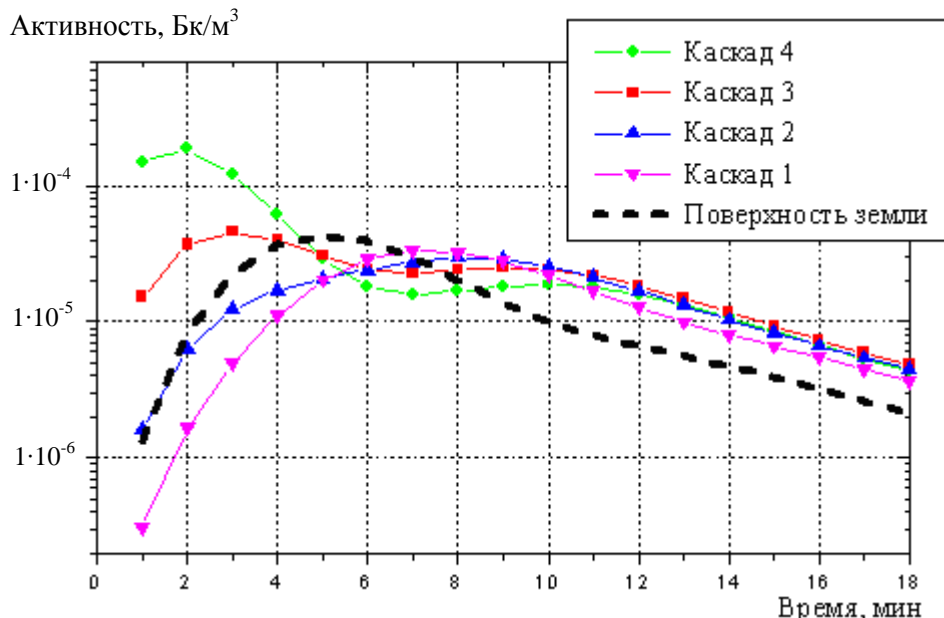


Рис. 10. Распределение объемной активности (Бк/м^3) на каскадах каскадной стены и на поверхности земли в зависимости от времени после окончания выброса.

Заключение

Проведенные расчеты показали, что уточненная методика расчета концентраций вредных примесей в непосредственной близости от места выброса эффективна для задач моделирования распространения промышленных выбросов с учетом влияния застройки, стратификации температуры, давления и скорости ветра. Эта методика дает более точные результаты.

Проведенный анализ подтвердил, что общепринятая методика ОНД-86 в целом удовлетворительно описывает концентрацию радиоактивных аэрозолей, усредненную за определенный период времени. Однако в первые минуты после выброса эта методика дает результаты, примерно на порядок заниженные по сравнению с уточненной. Таким образом, в процессе аварийного планирования для уменьшения радиационных рисков предложенный подход является предпочтительным. Его целесообразно применять для анализа возможных аварий и разработки мероприятий по уменьшению радиационных рисков на других ядерных и радиационных объектах, а также в процессе обращения с опасными ядерными, радиоактивными и химическими материалами.

В дальнейшем целесообразно провести более детальные расчеты и проанализировать зависимость различий предлагаемой методики и ОНД-86 для различных погодных условий. Целесообразно также разработать трехмерную модель и сравнить результаты расчетов с ОНД-86. Необходимо также провести анализ чувствительности предлагаемой модели.

Применение предложенной модели будет особенно полезно при расчетах распространения выбросов внутри зданий, так как упрощенных моделей (типа ОНД-86) для таких случаев не существует.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Batiy V.G., Mikhailyuk V.P., Rubezhanskiy Yu.I.* Mathematic modelling of radioactive dust rise during collapse of “Shelter” object building // *Problems of atomic science and technology. Series “Nuclear physics investigations”*. - 2004. - No. 5 (44). - P. 93. - 95.
2. *Batiy V., Rubezhansky Yu, Rud’ko V. et.al* Preliminary Accident Analysis for Construction and Operation of the Chornobyl New Safe Confinement // *Proceedings of American Nuclear Society Topical Meeting on Decommissioning, Decontamination, & Reutilization, Denver, USA, Aug. 7 - 11, 2005*, p. 210 - 213.
3. *Методика* расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 94 с.
4. *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.

Поступила в редакцию 15.12.05

**18 РОЗРАХУНОК КОНЦЕНТРАЦІЇ РАДІОАКТИВНИХ АЕРОЗОЛІВ БІЛЯ
ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ» НА ОСНОВІ УТОЧНЕНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МОДЕЛЕЙ**

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

Вирішено нестационарне завдання розповсюдження радіоактивного викиду в атмосфері в безпосередній близькості від об'єкта «Укриття». Обчислення проводилися на основі уточнених розрахункових методик, розроблених для підвищення радіаційної безпеки в процесі перетворення об'єкта "Укриття". Отримані результати можуть знайти застосування на діючих об'єктах атомної енергетики.

**18 CALCULATIONS OF RADIOACTIVE AEROSOL CONCENTRATION NEAR THE SHELTER ON THE
BASIS OF IMPROVED COMPUTER MODELS**

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

Non-stationary task of radioactive releases transport in atmosphere in immediate proximity to the Shelter was solved. Calculations were performed on the basis of improved calculations techniques, developed for increasing of radiation safety during the Shelter transformation. Received results could be used at operational objects of atomic energy industry.